

หลักการตรวจการได้ยิน

แบบสังเกตพฤติกรรม

Principles of Behavioral Hearing Tests



ศนัฐร ชาวน์ศิลป์

คณะแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

หลักการตรวจ การได้ยิน แบบสังเกตพฤติกรรม

Principles of Behavioral Hearing Tests

ศณัฐรรุ เชวณศิริศิลป์

คณะแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

คำนำ

การตรวจการได้ยินแบบสังเกตพฤติกรรม หรือ behavioral hearing tests ถือเป็นการประเมินการได้ยินแบบจิตวิสัย (subjective evaluation) ที่ต้องอาศัยความร่วมมือจากผู้ป่วยในการตอบสนองต่อสัญญาณเสียงแบบต่าง ๆ และเป็นการตรวจการได้ยินที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายเพื่อประเมินความสามารถในการได้ยินเบื้องต้น เช่น การตรวจการได้ยินด้วยเสียงบริสุทธิ์ (pure tone audiometry), การตรวจการได้ยินด้วยเสียงคำพูด (speech audiometry) เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีการตรวจประเภทอื่น ๆ โดยแต่ละประเภทจะให้รายละเอียดปัญหาการได้ยินของผู้ป่วยที่แตกต่างกันออกไป

หนังสือเล่มนี้จัดทำขึ้นโดยเรียบเรียงเนื้อหาสำคัญที่เกี่ยวกับการตรวจการได้ยินแบบสังเกตพฤติกรรมประเภทต่าง ๆ และได้รวบรวมหลักการพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับการตรวจการได้ยินที่ควรทราบเพื่อให้เกิดความเข้าใจในการตรวจมากขึ้น เหมาะสำหรับผู้ที่ทำงานเกี่ยวข้องกับผู้ป่วยที่มีปัญหาทางการได้ยิน เช่น โสต ศอ นาสิกแพทย์, แพทย์ประจำบ้าน, แพทย์เวชปฏิบัติทั่วไป, นักศึกษา รวมถึงผู้ที่มีความสนใจในเรื่องการตรวจการได้ยินและนักแก้ไขการได้ยิน เนื้อหาในหนังสือเริ่มจากพื้นฐานได้แก่ หลักการของเสียง, การได้ยินเบื้องต้น การรับรู้เสียงของมนุษย์ และอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับการตรวจ จากนั้นจึงกล่าวถึง การตรวจการได้ยินแบบสังเกตพฤติกรรมประเภทต่าง ๆ ทั้งการตรวจที่นิยมใช้ในปัจจุบัน และการตรวจที่ใช้ในอดีตแต่ยังมีหลักการที่น่าสนใจสำหรับนำมาปรับใช้ในการวินิจฉัยและดูแลรักษาผู้ป่วย การตรวจการได้ยินแบบสังเกตพฤติกรรมที่กล่าวถึงในหนังสือเล่มนี้จะกล่าวถึงการตรวจประเมินการได้ยินในผู้ใหญ่ หรือ เด็กโต ซึ่งเป็นผู้ที่สูญเสียการได้ยินแบบมีภาษามาก่อนแล้ว (post-lingual hearing loss) โดยไม่ได้กล่าวถึงการตรวจประเมินการได้ยินในทารกหรือเด็กเล็ก และไม่ได้กล่าวถึงการตรวจการได้ยินในผู้ที่สูญเสียการได้ยินแบบไม่รู้ภาษามาก่อน (pre-lingual hearing loss)

อย่างไรก็ตามเทคนิคการตรวจการได้ยินมีความหลากหลาย และมีรายละเอียดปลีกย่อยที่มีความแตกต่างกัน ผู้แต่งจึงได้เลือกเทคนิคที่เข้าใจง่ายและมีการอ้างอิงไว้ในตำราหรือแนวทางปฏิบัติที่เป็นมาตรฐาน เพื่อให้ผู้อ่านได้เข้าใจในหลักการเบื้องต้นก่อน ในทางปฏิบัติจริงนั้น ผู้อ่านสามารถปรับเทคนิคการตรวจได้ตามบริบทที่เหมาะสมโดยอ้างอิงจากหลักการพื้นฐานในหนังสือเล่มนี้

ผู้แต่งหวังเป็นอย่างยิ่งว่าหนังสือเล่มนี้จะเป็นประโยชน์แก่ผู้อ่านทุกท่านและสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการตรวจวินิจฉัยผู้ป่วยที่มีภาวะบกพร่องทางการได้ยินต่อไป

ศณัฐธร เชาวนศิศิลป์

สารบัญ

คำนิยม	iii
คำนำ	iv
กิตติกรรมประกาศ	v
สารบัญ	vi
สารบัญรูป	vii
สารบัญตาราง	xi
บทนำ	xiii
คำย่อ	xvi

ส่วนที่ 1 ความรู้พื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับการตรวจการได้ยิน

บทที่ 1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับเสียงและการได้ยินของมนุษย์	3
บทที่ 2 การเตรียมพร้อมก่อนตรวจการได้ยิน	47

ส่วนที่ 2 การตรวจการได้ยินมาตรฐานในปัจจุบัน

บทที่ 3 การตรวจการได้ยินด้วยเสียงบริสุทธิ์ (Pure Tone Audiometry)	67
บทที่ 4 การตรวจการได้ยินด้วยเสียงคำพูด (Speech Audiometry)	103
บทที่ 5 การใช้เสียงกลบสำหรับตรวจการได้ยิน (Clinical Masking)	129

ส่วนที่ 3 การตรวจการได้ยินอื่น ๆ

บทที่ 6 การตรวจ Uncomfortable Loudness Level (UCL) และ Most Comfortable Level (MCL)	157
บทที่ 7 การตรวจการได้ยินในอดิเต (Traditional Behavioral Hearing Test)	165
ดัชนี	190

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 แสดงทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นเสียงและทิศทางการสั่นของอนุภาคอากาศ	4
1.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และความยาวคลื่นในรูปแบบแปรผกผัน กล่าวคือเสียงที่มีความยาวคลื่นมากจะมีความถี่ต่ำและมีลักษณะเสียงทุ้ม ในขณะที่เสียงที่มีความยาวคลื่นสั้นจะมีความถี่สูงและมีลักษณะเสียงแหลม	5
1.3 แสดงตัวอย่างระยะห่าง 1 octave หรือ คู่แปด ของโน้ต ‘Cต่ำ’ (โน้ตตัวที่ 1) กับโน้ต ‘Cกลาง’ (โน้ตตัวที่ 8) ซึ่งจะเป็นโน้ตชื่อเดียวกันแต่เสียงโน้ต ‘Cกลาง’ จะมีค่าความถี่เป็น 2 เท่า ของเสียงโน้ต ‘Cต่ำ’	6
1.4 แสดงลักษณะคลื่นนิ่ง (standing waves) ที่เกิดขึ้นในสายกีตาร์ในรูปแบบต่าง ๆ	8
1.5 แสดงการเกิดคลื่นนิ่งในท่อ 3 รูปแบบ ได้แก่ ท่อปลายเปิด 2 ข้าง, ท่อปลายปิด 2 ข้าง และ ท่อปลายเปิดข้างเดียว	10
1.6 แสดงกราฟวงจรถ่วงน้ำหนักความถี่ ซึ่งทำหน้าที่ปรับค่าระดับเสียงที่วัดได้ ในหน่วย dB SPL ให้อยู่ในรูปแบบของการถ่วงน้ำหนักแบบต่าง ๆ	14
1.7 แสดงโครงสร้างหูทั้ง 3 ชั้น	15
1.8 แสดงภาพโครงสร้างและองค์ประกอบของหู	16
1.9 แสดงเยื่อแก้วหูข้างซ้าย	18
1.10 แสดงรูปกระดูกหู 3 ชั้น	19
1.11 แสดงโครงสร้างของหูชั้นใน และโครงสร้างภายในของหูชั้นใน ส่วน cochlea	20
1.12 แสดงโครงสร้างและความสัมพันธ์ระหว่าง osseous spiral lamina และ basilar membrane	21
1.13 แสดงโครงสร้างภายในของท่อ cochlea ที่ถูกแบ่งเป็น 3 ช่อง ได้แก่ scala media, scala vestibuli และ scala tympani	22
1.14 แสดงรูป organ of Corti ที่อยู่บน basilar membrane	23
1.15 แสดงภาพรวมของการส่งต่อพลังงานเสียง จาก acoustic energy ผ่านหูชั้นนอก เปลี่ยนเป็น mechanical energy บริเวณหูชั้นกลาง และเปลี่ยนเป็น hydro- mechanical energy ที่หูชั้นใน	24
1.16 แสดง traveling wave และ traveling wave envelopes	27
1.17 แสดง traveling wave envelopes ของเสียงแต่ละช่วงความถี่	28
1.18 แสดงลักษณะ tonotopicity แต่ละบริเวณใน auditory pathway	29
1.19 แสดงการนำเสียงผ่านอากาศ (air conduction) และ การนำเสียงผ่านกระดูก (bone conduction)	30

รูปที่	หน้า
3.11 แสดงระดับเสียงที่รู้สึกสัมผัสสะเทือน (vibrotactile threshold) ของการตรวจการนำเสียงผ่านอากาศ และการนำเสียงผ่านกระดูก	95
4.1 แสดงการหา SRT ด้วยวิธีการลดระดับเสียง (descending method) และวิธีการเพิ่มระดับเสียง (ascending method)	107
4.2 แสดงการหา SRT ด้วยวิธีการลดระดับเสียง (descending method) ตาม ASHA (1988)	108
4.3 แสดงการหา SRT ด้วยวิธีการลดระดับเสียง (descending method) ตาม ASHA (1988)	109
4.4 แสดง “speech banana”	111
4.5 แสดง speech banana ในภาษาไทย (Thai speech banana)	112
4.6 แสดงระดับการได้ยินของผู้ป่วย 2 คน บน audiogram ที่แสดง speech banana	113
4.7 แสดง “count-the-dots audiogram” ที่ใช้ประเมิน speech intelligibility index (SII) อ้างอิงจาก Killion และ Mueller (2010)	114
4.8 แสดง count-the-dots audiogram รูปแบบต่าง ๆ	115
4.9 แสดง PL-PB function ในผู้ที่มีการได้ยินปกติ	122
4.10 แสดง PL-PB function ในผู้ที่มีการได้ยินปกติและผู้ป่วยที่มีการสูญเสียการได้ยินชนิดต่าง ๆ	124
5.1 แสดง audiogram ของผู้ป่วยที่มีปัญหาการได้ยินที่หูข้างซ้าย	132
5.2 แสดงการเกิด crossover เมื่อตรวจการได้ยินแบบการนำเสียงผ่านอากาศ และการนำเสียงผ่านกระดูก	133
5.3 แสดงตัวอย่างอธิบายโอกาสการเกิด crossover, cross hearing และ IA ขณะทำการตรวจ	135
5.4 แสดงค่าเฉลี่ยของ IA ในหูฟังชนิด supra-aural headphones รุ่น TDH-39 และ insert earphones รุ่น ER-3	136
5.5 แสดงแผนภาพสรุปข้อบ่งชี้ในการปล่อยเสียงกลบ	138
5.6 แสดงตัวอย่าง audiogram ที่ตรวจโดยไม่ปล่อยเสียงกลบและใช้หูฟังแบบ supra-aural headphones	139
5.7 แสดงภาพเปรียบเทียบระหว่างการตรวจการนำเสียงผ่านกระดูกโดยไม่ปล่อยเสียงกลบ และการตรวจการนำเสียงผ่านกระดูกร่วมกับการปล่อยเสียงกลบในหูข้างตรงข้ามผ่าน supra-aural headphones	141
5.8 แสดงตำแหน่งของ bone vibrator และ supra-aural headphones เมื่อตรวจการนำเสียงผ่านกระดูกโดยไม่ปล่อยเสียงกลบในหูข้างตรงข้าม (BC masking)	142

รูปที่	หน้า
5.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเพิ่มระดับเสียงกลบ (effective masking level) ในหน่วย dBEML และการเพิ่มระดับเสียงบริสุทธิ์เพื่อหาระดับการได้ยินในหน่วย dBHL	146
5.10 แสดงผลตรวจที่ไม่พบ cross hearing	147
5.11 แสดงการเกิด cross hearing	148
5.12 แสดงการเกิด cross-masking หรือ overmasking	149
5.13 แสดงการเกิด central masking	150
6.1 แสดงการรายงานผลการตรวจ UCL ด้วยสัญลักษณ์บน audiogram	158
6.2 แสดงตัวอย่างการรับรู้เสียงในสิ่งแวดล้อมในระดับต่าง ๆ และ dynamic range ในผู้ป่วยที่มี SNHL	161
7.1 แสดงแผนภาพการตรวจ alternate binaural loudness balance (ABLB) test	168
7.2 แสดงการรายงานผล ABLB ของผู้ที่มีการได้ยินปกติทั้ง 2 ข้าง ในรูปแบบตาราง, laddergram และ Steinberg-Gardner diagram	168
7.3 แสดงลักษณะ complete recruitment	169
7.4 แสดงลักษณะ incomplete recruitment	170
7.5 แสดงลักษณะ no recruitment	171
7.6 แสดงลักษณะ decruitment หรือ loudness reversal	172
7.7 แสดงลักษณะ hyper-recruitment หรือ over-recruitment	173
7.8 แสดงแผนภาพเทคนิคการตรวจ difference limen for intensity (DLI) และการตรวจ short increment sensitivity index (SISI)	174
7.9 แสดงแผนภูมิผลตรวจ Owens tone decay test แต่ละชนิด	178
7.10 แสดงหลักการและกราฟที่ได้จากการตรวจ Bekesy audiometry	181
7.11 แสดงตัวอย่างผลตรวจ sweep-frequency Bekesy audiometry ทั้ง 5 ชนิด	184
7.12 แสดงตัวอย่างผลตรวจ sweep-frequency Bekesy audiometry type V ในผู้ป่วยที่ได้รับการวินิจฉัยเป็น functional hearing loss	185
7.13 แสดงกราฟที่ได้จากการตรวจ forward-backward discrepancy Bekesy audiometry	186

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แสดงค่าความเข้มเสียง (sound intensity) และ ความดันเสียง (sound pressure) ที่มากที่สุดที่มนุษย์สามารถทนได้ และน้อยที่สุดที่มนุษย์เริ่มได้ยิน	11
1.2 แสดงตัวอย่างการเปรียบเทียบลักษณะที่ได้จากการวัดคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของเสียง กับ ลักษณะการรับรู้เสียงของมนุษย์	35
2.1 แสดงตัวอย่างค่า RETSPLs ของหูฟังชนิดต่าง ๆ ในหน่วย dB SPL เมื่ออ้างอิงจากระดับความดันเสียงที่ 20 μ Pa	54
2.2 แสดงค่า RETFLs ของ bone vibrator ในหน่วย dB เมื่ออ้างอิงจากแรง 1 μ N และวัดจากการวาง bone vibrator บน artificial mastoid หรือ mechanical coupler	54
2.3 แสดงค่า RETSPLs เมื่อทำการปล่อยเสียงผ่านลำโพงเพื่อตรวจ sound field และฟังด้วยหูทั้ง 2 ข้าง เมื่อลำโพงอยู่ที่ตำแหน่ง 0°, 45° และ 90° azimuth	55
2.4 แสดงระดับเสียงในสิ่งแวดล้อมที่มากที่สุดยอมรับได้ในแต่ละช่วง octave (maximum octave-band levels: OBLs) เมื่อทำการตรวจการได้ยิน	59
2.5 แสดงมาตรฐาน American National Standards Institute (ANSI), International Electrotechnical Commission (IEC) และ International Organization for Standardization (ISO) ที่เกี่ยวข้องกับการประเมินและปรับเทียบอุปกรณ์-เครื่องมือและสิ่งแวดล้อมสำหรับการตรวจการได้ยิน	61
3.1 แสดงระดับการสูญเสียการได้ยินและค่าความถี่ที่นำมาใช้ในการคำนวณค่าเฉลี่ยของระดับการได้ยินของการนำเสียงผ่านอากาศ (pure tone average) โดยใช้เกณฑ์แบบต่าง ๆ	80
3.2 แสดงระดับความบกพร่องทางการได้ยินเมื่ออ้างอิงตามเกณฑ์ WHO (1991) ที่สัมพันธ์กับความสามารถในการได้ยิน-สื่อสารของผู้ป่วยและข้อแนะนำในการฟื้นฟูการได้ยิน	81
3.3 แสดงระดับการสูญเสียการได้ยินเมื่ออ้างอิงตามเกณฑ์ WHO (2020) ที่สัมพันธ์กับความสามารถในการได้ยินและการสื่อสารของผู้ป่วย	83
3.4 Guidelines for calculating percentage of monaural hearing impairment ซึ่งแสดงการแปลงค่า decibel sum of the hearing threshold level (DSHL) เป็นค่าร้อยละของการสูญเสียสมรรถภาพของการได้ยินข้างเดียว	85

ตารางที่	หน้า
3.5 แสดงตารางเมทริกซ์เพื่อหาร้อยละของการสูญเสียสมรรถภาพของการได้ยิน ทั้ง 2 ข้าง หรือ percentage of binaural hearing handicap	88
3.6 แสดงความสัมพันธ์ของร้อยละการสูญเสียสมรรถภาพของการได้ยินทั้ง 2 ข้าง กับ ร้อยละการสูญเสียสมรรถภาพของทั้งร่างกาย (Relationship of binaural hearing impairment to impairment of the whole person)	89
3.7 แสดงลักษณะที่พบจาก audiogram ในภาวะปกติและภาวะที่มีการสูญเสีย การได้ยินประเภทต่าง ๆ	91
3.8 แสดงคำอธิบายรูปแบบต่าง ๆ ของ audiogram	93
4.1 แสดงตัวอย่าง spondee words ภาษาอังกฤษที่ใช้ในการตรวจเพื่อหาระดับ การได้ยินของเสียงคำพูด	105
4.2 แสดงชุดคำศัพท์ภาษาอังกฤษที่ใช้ในการตรวจ speech discrimination (SD) score ของ CID W-22	116
4.3 แสดงชุดคำศัพท์ภาษาอังกฤษที่ใช้ในการตรวจ speech discrimination (SD) score ของ NU-6	117
4.4 แสดงชุดคำศัพท์ภาษาไทยที่ใช้ในการตรวจ speech discrimination (SD) score อ้างอิงจาก RAMA.SD-2	118
4.5 แสดงตัวอย่างชุดคำศัพท์ภาษาไทยที่ใช้ในการตรวจ speech discrimination (SD) score อ้างอิงจาก TU-RAMA PB'15 word lists	119
4.6 แสดงการแบ่งระดับความสามารถในการจำแนกเสียงคำพูดตามผล SD score	120
5.1 แสดงค่า interaural attenuation (IA) ในหน่วย dB ของ transducers แต่ละชนิด	134
5.2 แสดงการคำนวณตามข้อบ่งชี้ในการปล่อยเสียงกลบเมื่อทำการตรวจการนำเสียง ผ่านอากาศ (AC masking) ในหูข้างซ้ายด้วย supra-aural headphones โดยพิจารณาจากตัวอย่าง audiogram ในรูปที่ 5.5	140
5.3 แสดงการคำนวณตามข้อบ่งชี้ในการปล่อยเสียงกลบเมื่อทำการตรวจการนำเสียง ผ่านกระดูก (BC masking) ในหูข้างซ้าย โดยพิจารณาจากตัวอย่าง audiogram ในรูปที่ 5.5	140
5.4 แสดงค่า occlusion effect (OE) ที่ใช้พิจารณาประกอบการคำนวณ initial masking level (IML) เพื่อปล่อยเสียงกลบ สำหรับการตรวจการนำเสียงผ่าน กระดูก (BC masking)	143
7.1 แสดงชนิดของผลตรวจและการแปลผล sweep-frequency Bekesy audiometry	183

บทนำ

หนังสือเล่มนี้ตั้งใจเขียนขึ้นโดยมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อให้ทราบหลักการพื้นฐานของการตรวจการได้ยินแบบสังเกตพฤติกรรม หรือ behavioral hearing tests ซึ่งเป็นการตรวจประเมินการได้ยินเบื้องต้นที่นิยมกันอย่างแพร่หลาย เป็นการตรวจการได้ยินที่ผู้ตรวจต้องสังเกตลักษณะการตอบสนองต่อสัญญาณเสียงของผู้ป่วยขณะทำการตรวจ ซึ่งต้องอาศัยความร่วมมือจากผู้ป่วย ดังนั้นการให้ข้อมูลวิธีการตรวจเพื่อให้ผู้ป่วยเข้าใจและปฏิบัติตัวได้อย่างถูกต้องขณะทำการตรวจ จึงถือเป็นหนึ่งในปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อความน่าเชื่อถือของผลการตรวจเช่นกัน การตรวจการได้ยินแบบสังเกตพฤติกรรมนี้ ถือเป็นการตรวจการได้ยินเชิงจิตวิสัย หรือ subjective hearing tests และคำว่า “**การตรวจการได้ยิน**” ที่จะกล่าวต่อไปในหนังสือเล่มนี้ จึงหมายถึง “**การตรวจการได้ยินแบบสังเกตพฤติกรรม หรือ behavioral hearing tests**” ที่เป็นการตรวจทั่วไปในผู้ใหญ่หรือเด็กโตที่มีปัญหาการได้ยินและมีภาษามาก่อนแล้ว (post-lingual hearing loss) เท่านั้น ไม่รวมการตรวจการได้ยินประเภทอื่น ๆ เช่น การตรวจการได้ยินแบบ objective hearing tests, physiologic hearing tests หรือการตรวจการได้ยินในทารก-เด็กเล็กที่มีความบกพร่องทางการได้ยินและยังไม่มีภาษามาก่อน (pre-lingual hearing loss)

อย่างไรก็ตามเทคนิคการตรวจการได้ยินมีความหลากหลาย ผู้แต่งจึงได้เลือกเทคนิคที่เข้าใจง่ายและมีการอ้างอิงไว้ในตำราหรือแนวทางปฏิบัติที่เป็นมาตรฐาน เพื่อให้ผู้อ่านได้เข้าใจหลักการเบื้องต้นก่อน ในทางปฏิบัติจริงนั้น มักมีรายละเอียดปลีกย่อยอื่น ๆ แตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับประสบการณ์ของผู้ตรวจ ความคุ้นเคยกับอุปกรณ์-วิธีการตรวจ รวมถึงแนวปฏิบัติในแต่ละหน่วยตรวจการได้ยินที่ให้บริการ ผู้อ่านสามารถปรับเทคนิคการตรวจได้ตามความเหมาะสมกับบริบทโดยอ้างอิงจากหลักการพื้นฐานในหนังสือเล่มนี้

หนังสือเล่มนี้ได้ถูกแบ่งเป็น 3 ส่วน แต่ละส่วนประกอบด้วยบทย่อย ๆ จัดเรียงเริ่มจากพื้นฐานที่ควรทราบ การตรวจการได้ยินที่ใช้โดยทั่วไป ไปจนถึงการตรวจการได้ยินอื่น ๆ ที่ไม่ได้ใช้บ่อยในเวชปฏิบัติ และการตรวจการได้ยินที่ไม่นิยมทำแล้วในปัจจุบันแต่ยังมีหลักการการตรวจที่น่าสนใจและทำให้เข้าใจลักษณะของการสูญเสียการได้ยินมากขึ้น ดังนั้นหากเริ่มอ่านเรียงไปตั้งแต่บทแรกจะเป็นการค่อย ๆ ปูพื้นฐานไปตามลำดับ อย่างไรก็ตาม ผู้อ่านสามารถเลือกอ่านโดยไม่เรียงบทได้ตามความสนใจ โดยมีข้อแนะนำดังนี้

ส่วนที่ 1 ความรู้พื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับการตรวจการได้ยิน – กล่าวถึงพื้นฐานทั่วไปที่ควรทราบ เพื่อให้เข้าใจหลักการการตรวจการได้ยิน โดยบทที่ 1 มีเนื้อหาเกี่ยวกับพื้นฐานที่จำเป็นสำหรับการตรวจการได้ยิน ได้แก่ คุณลักษณะของเสียง, กลไกการได้ยินเบื้องต้น, หลักการของการสูญเสียการได้ยินแบบต่าง ๆ, การรับรู้เสียงของมนุษย์และ psychoacoustics รวมถึงที่มาและชนิดของหน่วยเดซิเบล (decibel: dB) เพื่อให้เข้าใจและทราบถึงที่มาที่ไปของหลักการในการตรวจการ

ได้ยิน สำหรับ**บทที่ 2** มีเนื้อหาเกี่ยวกับการจัดเตรียมก่อนทำการตรวจ แนะนำอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับการตรวจ รวมถึงจุดเด่นและข้อจำกัดของแต่ละอุปกรณ์, สภาพแวดล้อม-สิ่งแวดล้อมที่เหมาะสมกับการตรวจ และการประเมินผู้เข้ารับการตรวจ นอกจากนี้ยังกล่าวถึงรายละเอียดเบื้องต้นในการปรับเทียบ (calibration) อุปกรณ์แต่ละชนิด

ส่วนที่ 2 การตรวจการได้ยินมาตรฐานในปัจจุบัน – กล่าวถึงการตรวจการได้ยินที่ใช้เป็นประจำในทางปฏิบัติ ผู้อ่านที่สนใจเฉพาะกระบวนการตรวจการได้ยินสามารถข้ามส่วนที่ 1 มาอ่านในส่วนที่ 2 ได้ ภายในส่วนนี้ประกอบด้วย**บทที่ 3** การตรวจการได้ยินด้วยเสียงบริสุทธิ์ (pure tone audiometry) และ **บทที่ 4** การตรวจการได้ยินด้วยเสียงคำพูด (speech audiometry) สำหรับเรื่องการปล่อยเสียงกลบเพื่อตรวจการได้ยิน (clinical masking) นั้น ได้แยกกล่าวถึงใน**บทที่ 5** เนื่องจากมีรายละเอียดที่ซับซ้อน โดยก่อนจะอ่านบทที่ 5 นี้ ผู้อ่านควรอ่านบทที่ 3 มาก่อน

ส่วนที่ 3 การตรวจการได้ยินอื่น ๆ – กล่าวถึงการตรวจการได้ยินที่ไม่ได้ทำเป็นประจำ ได้แก่ **บทที่ 6** กล่าวถึงการตรวจ most comfortable level (MCL) และ uncomfortable loudness level (UCL) ซึ่งมีประโยชน์ในการปรับกำลังขยายของเครื่องช่วยฟัง, ประเมินผู้ป่วยที่มีภาวะ hyperacusis และประเมิน dynamic range และ **บทที่ 7** กล่าวถึงการตรวจการได้ยินที่ไม่นิยมทำแล้วในปัจจุบันแต่ยังถูกกล่าวถึงอยู่บ้าง การตรวจเหล่านี้ใช้หลักการการตรวจการได้ยินแบบสังเกตพฤติกรรมเช่นกัน แต่มีวัตถุประสงค์เพื่อดูตำแหน่งของพยาธิสภาพว่าอยู่บริเวณ cochlea หรือ retrocochlea ซึ่งมีหลักการการตรวจที่น่าสนใจและทำให้เข้าใจพยาธิสรีรวิทยาและอาการของผู้ป่วยที่มีพยาธิสภาพบริเวณ cochlea และ retrocochlea มากขึ้น ก่อนที่จะอ่านบทนี้ ผู้อ่านควรมีความเข้าใจในเรื่องการรับรู้เสียงของมนุษย์ที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 1 และหลักการตรวจการได้ยินด้วยเสียงบริสุทธิ์ที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 เนื่องจากเนื้อหามีความเชื่อมโยงกัน

โดยทั่วไปแล้ว การตรวจการได้ยินนั้น มีการใช้ศัพท์เทคนิค-ศัพท์ภาษาอังกฤษที่จำเพาะ ซึ่งหากนำมาแปลเป็นภาษาไทยแล้วอาจทำให้เกิดความเข้าใจคลาดเคลื่อน อีกทั้งในเวชปฏิบัติ การรายงานผลและการเรียนการสอน นิยมใช้คำศัพท์ภาษาอังกฤษเพื่อให้สื่อสารแล้วเข้าใจความหมายโดยง่าย ผู้แต่งจึงใช้คำศัพท์ภาษาอังกฤษในกรณีที่คำนั้นถูกแปลเป็นภาษาไทยแล้วทำให้เข้าใจยาก อย่างไรก็ตามในครั้งแรกที่มีการกล่าวถึงคำศัพท์ภาษาอังกฤษในแต่ละบทจะมีการเขียนอธิบายคำศัพท์นั้น เพื่อให้ผู้อ่านสามารถทำความเข้าใจได้ง่ายขึ้น

นอกจากนี้ การใช้คำภาษาไทยในชีวิตประจำวันหรือในทางปฏิบัติอาจยังมีความคลุมเครือและไม่สามารถระบุถึงลักษณะของเสียงได้อย่างชัดเจนในบางแง่มุม เช่น ปริมาณเสียงที่วัดได้ จะใช้คำว่า “ระดับเสียง (sound level หรือ sound pressure level)” ซึ่งเป็นการวัดคุณสมบัติเชิงวัตถุวิสัย (objective measurement) แต่ปริมาณเสียงที่มนุษย์รับรู้ จะใช้คำว่า “ระดับความดัง (loudness level)” หรือ “ความดัง-เบา” ซึ่งเป็นการวัดคุณสมบัติเชิงจิตวิสัย (subjective measurement) และในทางปฏิบัติแล้วนิยมสื่อสารด้วยคำเหล่านี้แทนมากกว่า เช่น ปล่อยสัญญาณเสียงที่ระดับความดัง

40 เดซิเบล มีความหมายที่แท้จริงคือ ปุ่มสัญญาณเสียงที่ระดับเสียง 40 เดซิเบล หรือ ระดับเสียงที่เบาที่สุดที่ได้ยิน มีความหมายที่แท้จริงคือ ระดับเสียงที่น้อยที่สุดที่ได้ยิน เป็นต้น ถึงแม้ว่าการใช้คำในภาษาไทยอาจทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการสื่อถึงความหมายที่แท้จริง แต่สามารถทำให้สื่อสารเข้าใจได้ง่ายกว่า ในหนังสือเล่มนี้ผู้แต่งอาจมีการสลับใช้คำเหล่านี้หรือใส่วงเล็บไว้ เพื่อทำให้เกิดความเข้าใจในเนื้อหาได้ง่ายขึ้น เช่น ระดับเสียงที่เพิ่มขึ้น (ดังขึ้น), ระดับเสียงที่น้อยที่สุด (เบาที่สุด) เป็นต้น (สำหรับรายละเอียดเพิ่มเติมเรื่องการรับรู้เสียงของมนุษย์ได้กล่าวไว้ในบทที่ 1)

เนื้อหาในหนังสือบางส่วนได้ถูกจัดทำเป็นคลิปการบรรยายซึ่งผู้อ่านสามารถรับชมเพิ่มเติมได้ทาง <https://cmu.to/BHT> หรือ สแกน QR code ด้านล่างนี้เพื่อรับชม



คำย่อ

ABLB test	Alternate Binaural Loudness Balance Test	MEMC	Minimal Effective Masking Correction
AC	Air Conduction	NTE	Non-Test Ear
ANSI	American National Standards Institute	OBLs	Octave-Band Levels
BC	Bone Conduction	OE	Occlusion Effect
BSA	British Society of Audiology	OHCs	Outer Hair Cells
dB	Decibel	PB score	Phonetically Balanced Score
dB(A)	Decibel A	PL function	Performance-Level Function
dBEML	Decibel Effective Masking Level	RETFLs	Reference Equivalent Threshold Force Levels
dBHL	Decibel Hearing Level	RETSPLs	Reference Equivalent Sound Pressure Levels
dBIL	Decibel Intensity Level	SAT	Speech Awareness Threshold
dbSL	Decibel Sensation Level	SD score	Speech Discrimination Score
dB SPL	Decibel Sound Pressure Level	SDT	Speech Detection Threshold
DLI	Difference Limen for Intensity	SF	Safety Factor
DSHL	Decibel Sum of the Hearing Threshold Level	SII	Speech Intelligibility Index
EAC	External Auditory Canal	SISI	Short Increment Sensitivity Index
Hz	Hertz	SRT	Speech Recognition (หรือ Reception) Threshold
IA	Interaural Attenuation	STAT	Suprathreshold Adaptation Test
IEC	International Electro-technical Commission	TE	Test Ear
IHCs	Inner Hair Cells	VU meter	Volume Unit Meter
IML	Initial Masking Level	WRS	Word Recognition Score
ISO	International Organization for Standardization		
MAF	Minimal Audible Field		
MAP	Minimal Audible Pressure		

ส่วนที่ 1

ความรู้พื้นฐาน

ที่เกี่ยวข้องกับการตรวจ
การได้ยิน



การตรวจการได้ยินแบบสังเกตพฤติกรรม หรือ behavioral hearing tests เป็นการตรวจการได้ยินที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายเพื่อประเมินความสามารถในการได้ยินเบื้องต้น เนื้อหาในหนังสือเล่มนี้กล่าวถึงพื้นฐานเบื้องต้นที่ควรทราบเกี่ยวกับการตรวจการได้ยิน หลักการตรวจการได้ยินแบบต่าง ๆ ที่นิยมใช้ในปัจจุบัน ได้แก่ การตรวจการได้ยินด้วยเสียงบริสุทธิ์ (pure tone audiometry) การตรวจการได้ยินด้วยเสียงคำพูด (speech audiometry) รวมถึงหลักการปล่อยเสียงกลบ (clinical masking) ขณะทำการตรวจ นอกจากนี้ยังมีเนื้อหาที่เกี่ยวข้องกับการตรวจการได้ยินในอดีตซึ่งมีหลักการที่น่าสนใจและทำให้เข้าใจอาการของผู้ป่วยที่มีพยาธิสภาพบริเวณ cochlea และ retrocochlea มากขึ้น เนื้อหาในหนังสืออ้างอิงจากตำราที่เป็นมาตรฐานสากล รวบรวมแนวทางปฏิบัติต่าง ๆ ที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย รวมถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พร้อมทั้งสอดแทรกการยกตัวอย่างเพื่อให้เข้าใจเนื้อหาได้ง่ายขึ้น

หนังสือเล่มนี้เหมาะสำหรับผู้ที่ทำงานเกี่ยวข้องกับผู้ป่วยที่มีปัญหาทางการได้ยิน เช่น โสต ศอ นาสิก แพทย์, แพทย์ประจำบ้าน, แพทย์เวชปฏิบัติทั่วไป, นักศึกษา รวมถึงผู้ที่มีความสนใจในเรื่องการตรวจการได้ยินและนักแก้ไขการได้ยิน โดยผู้อ่านสามารถนำหลักการพื้นฐานจากหนังสือเล่มนี้ไปประยุกต์ใช้ในการตรวจการได้ยินในเวชปฏิบัติได้ต่อไป



CHIANG MAI
UNIVERSITY PRESS

ISBN 978-616-398-714-3



9 786163 987143

บทที่ 1

ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับเสียงและการได้ยินของมนุษย์

เสียง

- คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของเสียง
- การกำทอนและคลื่นนิ่ง (Resonance and Standing Waves)
- เดซิเบล (Decibel: dB)

ความรู้ทางกายวิภาคและสรีรวิทยาเบื้องต้นที่เกี่ยวข้องกับการตรวจการได้ยิน

- กายวิภาคเบื้องต้นเกี่ยวกับระบบการได้ยิน
- สรีรวิทยาเบื้องต้นเกี่ยวกับระบบการได้ยิน
- การนำเสียง (Sound Transmission) และชนิดของการสูญเสียการได้ยิน
- ผลของการสูญเสียการได้ยินแบบ Peripheral Hearing Loss ต่อการนำเสียงผ่านอากาศและการนำเสียงผ่านกระดูก

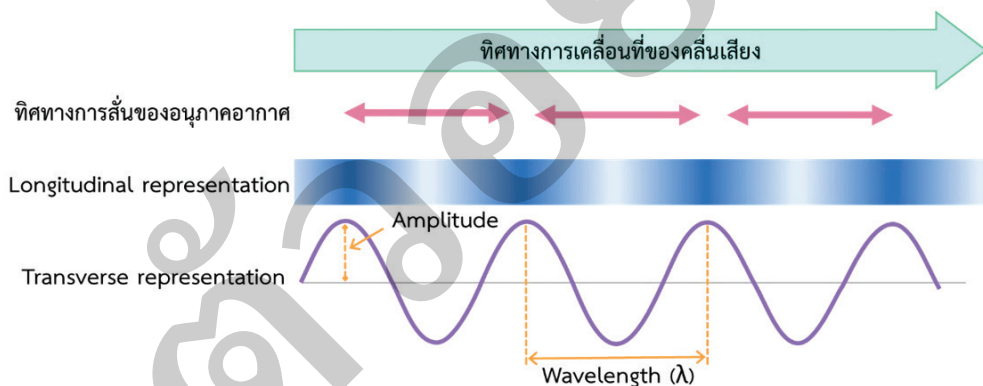
การรับรู้เสียงของมนุษย์ (Human Sound Perception and Psychoacoustics)

- ระดับการได้ยิน (Hearing Threshold)
- ชนิดของ Decibel เกี่ยวข้องกับการตรวจการได้ยินแบบสังเกตพฤติกรรม

เสียง

เสียงเป็นพลังงานที่เกิดจากการสั่นสะเทือนจากแหล่งกำเนิดเสียงและเคลื่อนที่เป็นลักษณะคลื่นผ่านตัวกลาง¹ ซึ่งตัวกลางนั้นสามารถเป็นได้ทั้งของแข็ง ของเหลว หรืออากาศ มนุษย์ได้ยินเสียงในชีวิตประจำวันผ่านตัวกลางที่เป็นอากาศ คลื่นเสียงถูกส่งต่อโดยการสั่นสะเทือนของอนุภาคอากาศ (air particles) ที่เคลื่อนที่แบบไปและกลับ (to-and-fro motion หรือ oscillation)² การเคลื่อนที่ลักษณะดังกล่าวทำให้เกิดรูปแบบการอัดตัว (condensation) และกระจายตัว (rarefaction) ของอนุภาคอากาศสลับกันไป^{1, 2} ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของความดันอากาศเป็นช่วง ๆ ในขณะที่คลื่นเสียงเคลื่อนที่ เมื่อคลื่นเสียงนั้นเคลื่อนที่ถึงหูของมนุษย์จึงเกิดการรับเสียงและส่งผ่านสัญญาณเสียงนั้นไปยังสมองเพื่อแปลผลต่อไป ดังนั้นการเกิดเสียงและกระบวนการการได้ยินต้องอาศัยแหล่งกำเนิดเสียง ตัวกลาง ตัวรับเสียง และการแปลผลเสียงที่รับเข้ามา

คลื่นเสียงมีลักษณะเป็นคลื่นแนวยาว หรือ longitudinal wave กล่าวคือ ทิศทางการสั่นสะเทือนของอนุภาคตัวกลางอยู่ในแนวเดียวกับทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นเสียง² อย่างไรก็ตามเพื่อให้เข้าใจง่ายขึ้น คลื่นเสียงจึงถูกปรับให้แสดงในรูปของคลื่นแนวขวาง หรือ transverse wave แทน ซึ่งมีลักษณะเป็น sinusoid wave หรือ sine wave ดังรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 แสดงทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นเสียงและทิศทางการสั่นของอนุภาคอากาศที่เป็นไปในทิศทางเดียวกันกับคลื่นเสียง เมื่อแสดงลักษณะเป็นแบบ longitudinal จะเห็นบริเวณที่มีปริมาณอนุภาคอากาศอัดแน่น (condensation) สลับกับบริเวณที่อนุภาคอากาศกระจายตัว (rarefaction) แต่เมื่อเปลี่ยนการแสดงผลเป็นแบบ transverse จะได้คลื่นที่มีลักษณะเป็น sinusoid wave โดยจุดที่สูงที่สุดของคลื่นคือจุดที่มีความหนาแน่นของอนุภาคอากาศมากที่สุด ในขณะที่จุดต่ำสุดของคลื่นคือจุดที่มีความหนาแน่นของอนุภาคอากาศน้อยที่สุด ความยาวคลื่น (wavelength หรือ λ) คือ ระยะที่คลื่นเคลื่อนที่ครบ 1 รอบ โดยวัดระยะทางจากตำแหน่งเดียวกันของรอบคลื่นที่ติดกัน จากภาพจะเป็นการวัดความยาวคลื่นจากจุดสูงสุดของคลื่นที่อยู่ติดกัน ส่วนความสูงของคลื่น (amplitude) จะแปรผันตรงกับระดับความดังเสียง

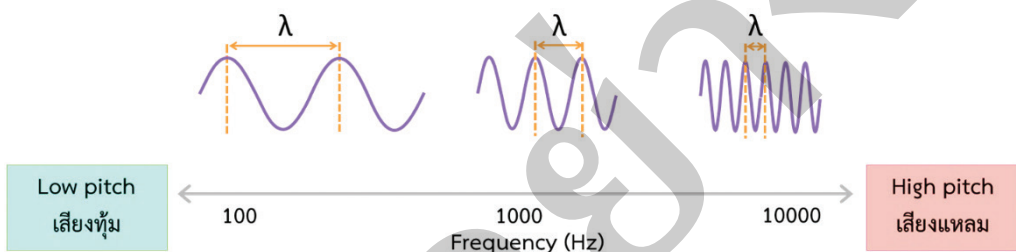
(ภาพโดยผู้แต่ง)

คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของเสียง

เพื่อให้เข้าใจสรีรวิทยาของการได้ยินและหลักการตรวจการได้ยินมากขึ้น จึงควรทราบคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของเสียงบางประการ ดังนี้

1. **Wavelength (λ)** หรือ **ความยาวคลื่น** คือ ระยะทางที่คลื่นเคลื่อนที่ครบ 1 รอบ โดยวัดจากตำแหน่งเดียวกันของรอบคลื่นที่ติดกัน¹⁻⁴ เช่น วัดจากจุดสูงสุดของคลื่นที่อยู่ติดกัน หรือ วัดจากจุดต่ำสุดของคลื่นที่อยู่ติดกัน เป็นต้น

2. **Frequency (f)** หรือ **ความถี่** คือ จำนวนรอบคลื่นใน 1 วินาที มีหน่วยเป็น รอบต่อวินาที หรือ เฮิรตซ์ (Hertz: Hz) โดยความถี่มีความสัมพันธ์แบบแปรผกผันกับความยาวคลื่น¹⁻⁴ กล่าวคือ หากความถี่เพิ่มขึ้น ความยาวคลื่นจะลดลง ความถี่เป็นตัวบอกคุณสมบัติความถี่แหลมของเสียง โดยเสียงที่มีความถี่สูงจะมีลักษณะแหลม แต่เสียงที่มีความถี่ต่ำจะมีลักษณะทุ้ม ดังแสดงในรูปที่ 1.2



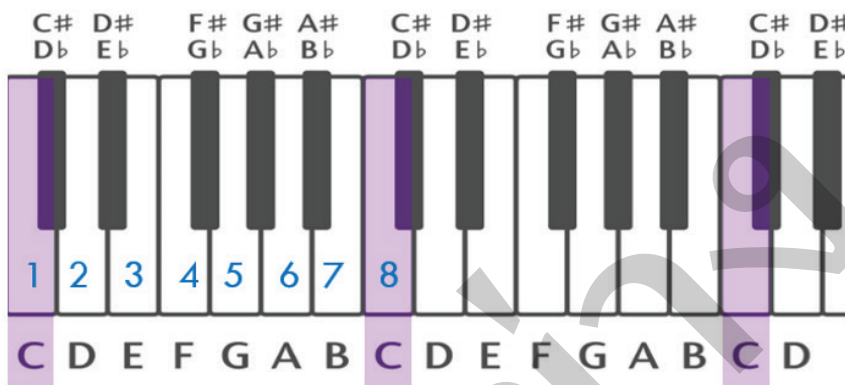
รูปที่ 1.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และความยาวคลื่นในรูปแบบแปรผกผัน กล่าวคือเสียงที่มีความยาวคลื่นมากจะมีความถี่ต่ำและมีลักษณะเสียงทุ้ม ในขณะที่เสียงที่มีความยาวคลื่นสั้นจะมีความถี่สูงและมีลักษณะเสียงแหลม (ภาพโดยผู้แต่ง)

Octave หรือ **คู่แปด** คือ ระยะห่างของเสียง 2 เสียงที่มีความถี่แตกต่างกัน โดยเสียงหนึ่งมีความถี่เป็น 2 เท่า ของอีกเสียงหนึ่ง (หรือเสียง 2 เสียง นั้น มีความถี่แตกต่างกัน 1 เท่าตัว) เช่น

- เสียงความถี่ 4000 Hz มีค่าความถี่เป็น 2 เท่าของ เสียงความถี่ 2000 Hz แสดงว่าเสียงความถี่ 2000 และ 4000 Hz ห่างกัน 1 octave
- เสียงความถี่ 500 Hz มีค่าความถี่เป็น 2 เท่าของ เสียงความถี่ 250 Hz แสดงว่าเสียงความถี่ 250 และ 500 Hz ห่างกัน 1 octave

นอกจากนี้ **semi-octave** หรือ **inter-octave frequency** จะหมายถึงเสียงที่มีความถี่อยู่กึ่งกลางระหว่างช่วง octave นั้น ๆ เช่น เสียงความถี่ 3000 Hz เป็น semi-octave frequency ของเสียงความถี่ 2000 Hz และ 4000 Hz, เสียงความถี่ 1500 Hz เป็น semi-octave frequency ของเสียงความถี่ 1000 Hz และ 2000 Hz เป็นต้น

(Octave หรือ คู่แปด เป็นคำศัพท์ที่มาจากทฤษฎีดนตรีสากล ใช้เรียกตัวโน้ตที่มีความห่างกัน 8 ตัว ซึ่งจะเป็นโน้ตชื่อเดียวกันแต่เสียงโน้ตตัวที่ 8 จะมีค่าความถี่เป็น 2 เท่า ของเสียงโน้ตตัวที่ 1 เช่น โน้ต ‘Cต่ำ’ กับโน้ต ‘Cกลาง’ เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 1.3)



(ภาพโดยผู้แต่ง)

3. Sound velocity (c) หรือ ความเร็วเสียง แสดงผลในหน่วยระยะทางต่อ 1 หน่วยเวลา เช่น เมตรต่อวินาที (m/s) เป็นต้น เสียงเดินทางในตัวกลางแต่ละชนิดด้วยความเร็วที่ต่างกัน¹⁻⁴ เช่น เสียงเดินทางในอากาศที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ด้วยความเร็ว 344 เมตรต่อวินาที หรือ เสียงเดินทางในน้ำที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ด้วยความเร็ว 1,461 เมตรต่อวินาที เป็นต้น⁵ ความเร็วเสียง ขึ้นอยู่กับความยืดหยุ่นและความหนาแน่นของตัวกลางแต่ละชนิด นอกจากนี้ อุณหภูมิของตัวกลาง ยังมีผลต่อความเร็วเสียงอีกด้วย⁵

ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเสียง, ความถี่ และความยาวคลื่น แสดงดังสมการ

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad \text{หรือ} \quad f = \frac{c}{\lambda}$$

4. **Amplitude** หรือ **ความสูงของคลื่น** แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงความดันเสียง (sound pressure) ซึ่งมีความสัมพันธ์โดยตรงกับพลังงานเสียงและการรับรู้ความดังของเสียง¹⁻⁴ คลื่นเสียงที่มี amplitude สูงจะมีความดันเสียงสูงและมนุษย์จะรับรู้ว่าเป็นเสียงที่ดัง

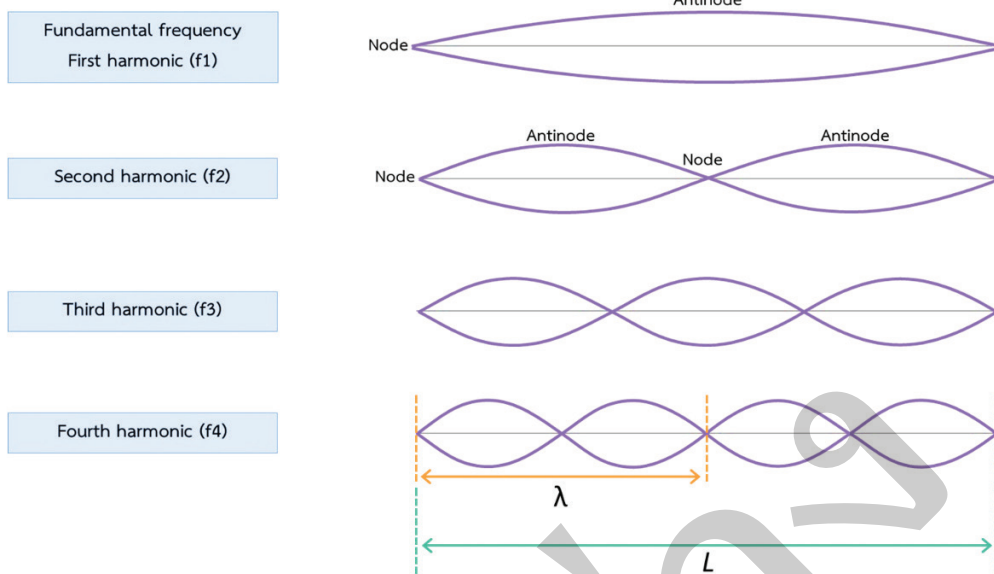
5. **Sound pressure (P)** หรือ **ความดันเสียง** เป็นค่าความดันของอากาศที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อเทียบกับความดันบรรยากาศรอบ ๆ ขณะที่คลื่นเสียงเดินทางผ่าน โดยจุดที่ความดันเปลี่ยนแปลงไปมากที่สุดเทียบได้กับตำแหน่งสูงสุดของคลื่นเสียง (หรือ amplitude) ความดันเสียงมีหน่วยเป็น นิวตันต่อตารางเมตร (Newton/m^2 : N/m^2) หรือ ปาสคาล (Pascal: Pa)¹⁻⁴

6. **Sound intensity (I)** หรือ **ความเข้มเสียง** คือ ปริมาณกำลังเสียง (sound power) ต่อหน่วยพื้นที่รับเสียง มีหน่วยเป็น วัตต์ต่อตารางเมตร (Watt/m^2) นอกจากนี้ความเข้มเสียงยังแปรผันตรงกับกำลังสองของความดันเสียง¹ ($I \propto P^2$)

การกำทอนและคลื่นนิ่ง (Resonance and Standing Waves)

วัตถุแต่ละชนิดมีความถี่ธรรมชาติ (natural frequencies) ที่แตกต่างกันและเป็นคุณสมบัติที่จำเพาะ² เมื่อมีพลังงานจากภายนอกมากระทำต่อวัตถุดังกล่าวด้วยความถี่ที่ตรงกับความถี่ธรรมชาติของวัตถุนั้น จะทำให้วัตถุเกิดการสั่นสะเทือนได้โดยง่าย และสามารถทำให้เกิดการสั่นสะเทือนที่มี amplitude สูงที่สุดได้เมื่อเทียบกับความถี่อื่น ๆ ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า **การกำทอน** หรือ **การสั่นพ้อง (resonance)** และความถี่ที่ทำให้เกิดการกำทอนนี้เรียกว่า **resonance frequency**^{2, 4, 6}

ตัวอย่างการกำทอนของเสียงที่เห็นได้ชัด คือ การเกิดการกำทอนในสายกีตาร์ที่ปลายสายทั้ง 2 ข้างถูกยึดตรึงไว้กับตัวกีตาร์ เมื่อนักดนตรีดีดสายกีตาร์จะทำให้สายกีตาร์เกิดการสั่นสะเทือน และเป็นจุดเริ่มต้นให้เกิดคลื่นเสียงเคลื่อนที่ไปยังปลายสายที่ถูกตรึงไว้ทั้ง 2 ข้าง จากนั้นคลื่นเสียงจึงสะท้อนกลับจากปลายสายเคลื่อนที่กลับมาในทิศทางตรงกันข้ามแล้วรวมตัวกัน โดยที่คลื่นเสียงนั้นยังคงความถี่เดิมและเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วเดิม การรวมตัวของคลื่นจะทำให้เกิดบริเวณที่มีการสั่นสะเทือนสูงสุดซึ่งเป็นบริเวณที่มี amplitude สูงสุด เรียกว่า **“antinode”** และบริเวณที่เกิดการหักล้างกัน เรียกว่า **“node”** นอกจากนี้ การรวมตัวดังกล่าวจะทำให้เกิดลักษณะคลื่นที่เหมือนหยุดนิ่งอยู่กับที่ จึงเรียกคลื่นที่เกิดจากการรวมตัวนี้ว่า **“คลื่นนิ่ง”** หรือ **“standing waves”** โดย node ของคลื่นนิ่งจะอยู่บริเวณปลายสายที่ถูกตรึงไว้ ทั้ง 2 ข้าง^{2, 4, 6} ดังแสดงในรูปที่ 1.4



รูปที่ 1.4 แสดงลักษณะคลื่นนิ่ง (standing waves) ที่เกิดขึ้นในสายกีตาร์ (ความยาว = L) ในรูปแบบต่าง ๆ (ภาพโดยผู้แต่ง อ้างอิงจาก Gelfand SA. Acoustics and sound measurement. In: Gelfand SA, editor. Essentials of audiology. 4th ed. New York: Thieme; 2016. p. 19. และ Department of Linguistics - MacQuarie University. Standing waves and resonance [Internet]. Sydney [updated 2020 Mar 12; cited 2021 Nov 25]. Available from: <https://www.mq.edu.au/about/about-the-university/our-faculties/medicine-and-health-sciences/departments-and-centres/departments-of-linguistics/our-research/phonetics-and-phonology/speech/acoustics/acoustic-theory-of-speech-production/standing-waves-and-resonance>.)

จากรูปที่ 1.4 จะเห็นว่า สายกีตาร์ที่มีความยาวเดิม (L) สามารถทำให้เกิดการกำทอนได้หลายรูปแบบและได้คลื่นนิ่งที่มีจำนวนคลื่นแตกต่างกัน โดยคลื่นนิ่งที่มีความยาวมากที่สุด (รูปแรก) จะมีระยะทางเท่ากับความยาวสายกีตาร์ (L) ซึ่งเป็นระยะที่เทียบเท่ากับครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น ($\lambda/2$) เมื่อนำมาแทนค่าเพื่อคำนวณความถี่ สามารถแสดงเป็นสมการได้ ดังนี้

$$\text{จาก } f = \frac{c}{\lambda} \quad \text{และ} \quad L = \frac{\lambda}{2} \quad \text{แทนค่าได้} \quad f = \frac{c}{2L}$$

จากสมการ แสดงว่า ความถี่ที่ต่ำที่สุดที่ทำให้เกิดการกำทอน จะมีความยาวคลื่น (λ) เท่ากับสองเท่าของความยาวสายกีตาร์ (L) และถือว่าความถี่นี้คือ “**ความถี่หลัก**” หรือ “**fundamental frequency**” หรือ “**first harmonic (f1)**”

ความถี่ถัดไปที่ทำให้เกิดการกำทอนจะเป็นความถี่มีค่าเท่ากับจำนวนเท่า (จำนวนเต็ม) ของ fundamental frequency เช่น 2, 3, 4 เท่า โดยจะเรียกความถี่ดังกล่าวเป็น second, third, fourth harmonic หรือ f_2, f_3, f_4 ตามลำดับ^{2, 4} ซึ่ง node ของคลื่นนิ่งที่เป็น harmonic นี้ จะอยู่ที่ปลายสาย 2 ข้างที่ถูกตรึงไว้เสมอ

สายกีตาร์ทั้ง 6 เส้น มีความจำเพาะกับตัวโน้ต ซึ่งแสดงถึงคุณลักษณะที่จำเพาะ โดยความถี่ธรรมชาตินั้นขึ้นอยู่กับมวลของสายกีตาร์, ความตึงของสายกีตาร์ และความยาวของสายกีตาร์² ทั้งมวลและความตึงของสายกีตาร์นั้นเป็นปัจจัยในการกำหนดความเร็วเสียง² โดยสังเกตได้ว่าหากนักดนตรีดีดสายกีตาร์เส้นเดิม แต่เลื่อนนิ้วบนคอกีตาร์ไปยังเฟรตที่สูงขึ้น จะได้เสียงตัวโน้ตที่มีความถี่สูงขึ้น (หรือเสียงแหลมขึ้น) เนื่องจากปลายสายที่ถูกตรึงไว้ทั้ง 2 ข้าง มีระยะห่างลดลง จึงเสมือนว่าสายกีตาร์นั้นสั้นลง

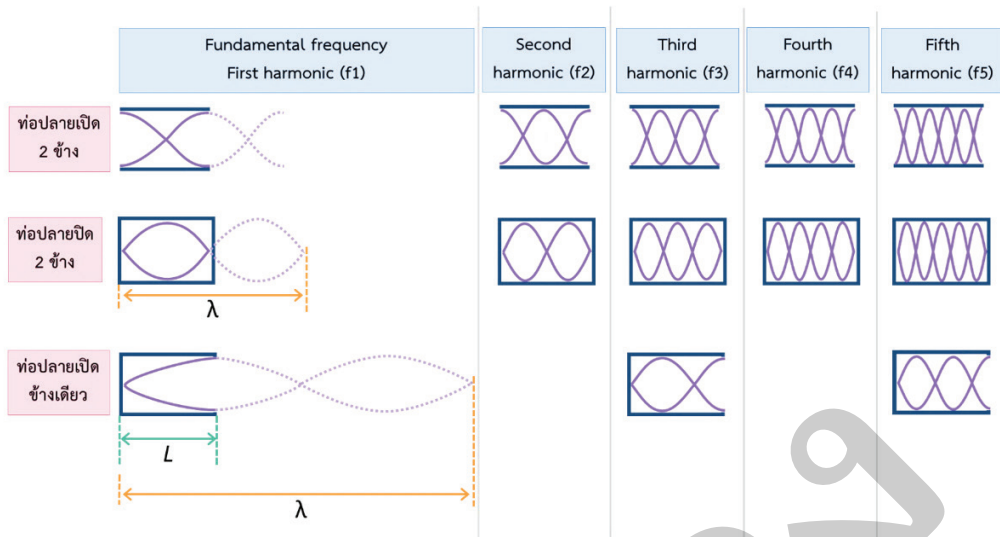
นอกจากนี้ การกำทอนของเสียงสามารถเกิดขึ้นในท่อกลมได้เช่นกัน ซึ่งเกิดจากการสั่นของอนุภาคอากาศที่อยู่ภายในท่อที่มีความถี่ตรงกับ resonance frequency ของท่อนั้น² โดย resonance frequency จะขึ้นอยู่กับ (1) ความยาวของท่อ (L) และ (2) ลักษณะปลายท่อ ว่าเป็นท่อปลายเปิดทั้ง 2 ด้าน, ปลายปิดทั้ง 2 ด้าน หรือ ปลายเปิด 1 ด้าน^{2, 6, 7} ดังแสดงในรูปที่ 1.5

จากรูปที่ 1.5 จะเห็นได้ว่า

- **ท่อปลายเปิด 2 ข้าง** - เมื่อเกิดการกำทอนจะพบ antinode อยู่ที่ปลายเปิดท่อทั้ง 2 ข้าง โดยความยาวท่อมามีค่าเท่ากับครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่นเสียงที่มีความถี่ต่ำที่สุดที่ทำให้เกิดการกำทอน และถือว่าความถี่นี้คือความถี่หลัก (fundamental frequency) หรือ first harmonic (f_1) จึงเรียกท่อที่มีปลายเปิด 2 ข้างนี้ว่า half-wavelength resonator ความถี่ถัดไปที่ทำให้เกิดการกำทอนจะเป็นความถี่มีค่าเท่ากับจำนวนเท่า (จำนวนเต็ม) ของ fundamental frequency เช่น 2, 3, 4 เท่า โดยจะเรียกความถี่ดังกล่าวเป็น second, third, fourth harmonic หรือ f_2, f_3, f_4 ตามลำดับ

- **ท่อปลายปิด 2 ข้าง** - เมื่อเกิดการกำทอนจะพบ node อยู่ที่ปลายท่อทั้ง 2 ข้าง ซึ่งเป็นปลายปิด โดยความยาวท่อมามีค่าเท่ากับครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่นเสียงที่มีความถี่ต่ำที่สุดที่ทำให้เกิดการกำทอนเช่นกัน

- **ท่อปลายเปิดข้างเดียว** - เมื่อเกิดการกำทอนจะพบ จะพบ node อยู่ที่ปลายปิด และ antinode อยู่ที่ปลายเปิดของท่อ โดยความยาวท่อมามีค่าเท่ากับ $1/4$ เท่าของความยาวคลื่นเสียงที่มีความถี่ต่ำที่สุดที่ทำให้เกิดการกำทอน และถือว่าความถี่นี้คือความถี่หลัก (fundamental frequency) หรือ first harmonic (f_1) จึงเรียกท่อที่มีปลายเปิดข้างเดียวนี้ว่า quarter-wavelength resonator ความถี่ถัดไปที่ทำให้เกิดการกำทอนจะเป็นความถี่ที่มีจำนวนเท่าเป็นเลขคี่ของ fundamental frequency เช่น 3, 5, 7 เท่า โดยจะเรียกความถี่เหล่านี้ว่าเป็น third, fifth, seventh harmonic หรือ f_3, f_5, f_7 ตามลำดับ



รูปที่ 1.5 แสดงการเกิดคลื่นนิ่งในท่อ 3 รูปแบบ ได้แก่ ท่อปลายเปิด 2 ข้าง, ท่อปลายปิด 2 ข้าง และ ท่อปลายเปิดข้างเดียว

(ภาพโดยผู้แต่ง อ้างอิงจาก Gelfand SA. Acoustics and sound measurement. In: Gelfand SA, editor. Essentials of audiology. 4th ed. New York: Thieme; 2016. p. 19. ; Department of Linguistics - MacQuarie University. Standing waves and resonance [Internet]. Sydney [updated 2020 Mar 12; cited 2021 Nov 25]. Available from: <https://www.mq.edu.au/about/about-the-university/our-faculties/medicine-and-health-sciences/departments-and-centres/departments-of-linguistics/our-research/phonetics-and-phonology/speech/acoustics/acoustic-theory-of-speech-production/standing-waves-and-resonance>. และ Acoustical Engineer. Fundamental frequency calculator [Internet]. [Available from: <https://acousticalengineer.com/fundamental-frequency-calculator/>].)

การกำหนดในท่อปลายเปิดข้างเดียวนี้สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับกลไกการได้ยินบริเวณหูชั้นนอกได้ โดยช่องหูเปรียบเสมือนท่อที่มีปลายเปิด 1 ด้านอยู่ที่รูหู และปลายปิด 1 ด้าน อยู่ที่เยื่อแก้วหู อย่างไรก็ตาม เนื่องจากช่องหูไม่ได้มีลักษณะเป็นท่อทรงกระบอกตรง ๆ, พื้นที่หน้าตัดไม่เป็นวงกลม และพื้นที่หน้าตัดอาจไม่ได้เท่ากันตลอดความยาวของช่องหู ปัจจัยเหล่านี้จึงส่งผลต่อการสั่นพ้องของอนุภาอากาศในช่องหูได้เช่นกัน

นอกจากนี้ การกำหนดในท่อปลายปิด 2 ข้าง ยังมีโอกาสเกิดขึ้นได้ขณะใส่หูฟังเพื่อตรวจการได้ยิน โดยเมื่อปล่อยเสียงที่มีความถี่ตรงกับ resonance frequency ผ่านหูฟัง สามารถทำให้เกิดคลื่นนิ่งในช่องหู ส่งผลให้ผลตรวจการได้ยินคลาดเคลื่อนจากความเป็นจริงได้ (รายละเอียดเพิ่มเติมในบทที่ 3)