หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# บทที่ 3

## การคำนวณออกแบบและการสร้างเลนส์

ในบทที่ 1 ได้กล่าวแล้วว่าโนดัลสไลดเบนชประกอบด้วยส่วนหลัก 3 ส่วน คือ คอลลิเมเตอร์ แท่นวางเลนส์ทดสอบ และกล้องจุลทัศน์เชิงซ้อน ในบทนี้จะได้กล่าวถึงส่วนที่เกี่ยวข้องกับทัศนศาสตร์เท่านั้น นั่นคือ การคำนวณออกแบบและสร้างเลนส์สำหรับคอลลิเมเตอร์ และสำหรับกล้องจุลทัศน์เชิงซ้อน เลนส์ของคอลลิเมเตอร์เป็นเลนส์รวมแสง แสงที่ออกจากเลนส์เป็นแสงขนาน ส่วนกล้องจุลทัศน์เชิงซ้อนประกอบด้วยเลนส์นูนสองระบบ คือ เลนส์หน้าและเลนส์ใกล้ตา เลนส์ทั้งหมดที่จะสร้างขึ้นนี้ จะเป็นเลนส์ 2 อันประกบกัน เพื่อสะดวกในการกำจัด ความคลาดรงค์ โคมา และความคลาดทรงกลม

### 1. การคำนวณออกแบบเลนส์สำหรับคอลลิเมเตอร์

ในการคำนวณออกแบบเลนส์สำหรับคอลลิเมเตอร์นี้ จะแยกเป็น 2 ส่วนด้วยกัน คือ การคำนวณออกแบบรูปร่างเลนส์รงค์และการคำนวณเลือกรูปร่างเลนส์รงค์เพื่อแก้ความคลาดทรงกลม และให้โคมาเป็นศูนย์

1.1 การคำนวณออกแบบรูปร่างเลนส์ เลนส์สำหรับคอลลิเมเตอร์จะเป็นเลนส์รงค์ชนิดเลนส์คู่ประกบและเป็นเลนส์รวมแสงซึ่งมีทางยาวโฟกัส 200 มิลลิเมตร มีขนาด 50 มิลลิเมตร แก้วที่มีอยู่แล้วเป็นแก้วแบเรียมคราวน์ชนิดแน่น ( Dense Barium Crown ) ซึ่งมีค่าดัชนีหักเหสำหรับแสงเหลืองจากธาตุโซเดียม ( $n_D$ ) เป็น 1.62270 และค่าวีเป็น 56.89 และแก้วฟลินท์ชนิดแน่น ( Dense Flint ) ซึ่งมีค่าดัชนีหักเหสำหรับแสงเหลืองจากธาตุโซเดียม ( $n_D$ ) เป็น 1.69865 และค่าวีเป็น 32.02 เลนส์รงค์ที่จะทำขึ้นจึงต้องทำจากแก้วทั้งสองชนิดนี้

เนื่องจากเลนส์รวมแสงที่จะทำขึ้นประกอบด้วยเลนส์สองอัน ในการคำนวณขั้นต่อไปจะเห็นได้ว่าเลนส์อันหนึ่งต้องมีอำนาจในการรวมแสงคือ เป็นเลนส์นูน เลนส์อีกอันหนึ่งเป็นเลนส์เว้า การใช้สัญญลักษณ์ต่าง ๆ ยังคงเป็นไปตามบทที่ 1

จากที่กำหนดให้ เลนส์สำหรับคอลลิเมเตอร์ที่จะสร้างนี้เป็นเลนส์ที่มีทางยาวโฟกัส ( $f_D$ ) เป็น 200 มิลลิเมตร ดังนั้น กำลังของเลนส์รวมแสง ($K_D$) $= \frac{1}{f_D} = \frac{1}{200}$ $= 0.005$ ต่อมิลลิเมตร

สำหรับการคำนวณนี้จะคำนวณโดยวิธีเฉพาะสิ่งจุดที่นิยม ตำแหน่งที่ 6 โดยใช้สมการ (2.10)

$$K'_D = K_D \frac{V'}{V'-V''} \quad \text{และ} \quad K''_D = - K_D \frac{V''}{V'-V''}$$

จะหากำลังของเลนส์ประกอบแต่ละอันของเลนส์รวมแสงได้ ดังนั้น กำลังของเลนส์ประกอบที่ทำจากแก้วแบเรียมคราวน์ชนิดแน่น ซึ่งมีค่าวีเป็น 56.89 มีค่าเป็น

$$K'_D = + \frac{1}{200} \times \frac{56.89}{(56.89 - 32.02)} = + 0.011437 \quad \text{ต่อมิลลิเมตร}$$

กำลังของเลนส์ประกอบมีเครื่องหมายเป็นบวก แสดงให้เห็นว่าเลนส์ประกอบที่ทำจากแก้วแบเรียมคราวน์ชนิดแน่นซึ่งมีค่าวีเป็น 56.89 มีลักษณะเป็นเลนส์นูน ส่วนกำลังของเลนส์ประกอบที่ทำจากแก้วฟลินท์ชนิดแน่นซึ่งมีค่าวีเป็น 32.02 มีค่าเป็น

$$K''_D = - \frac{1}{200} \times \frac{32.02}{(56.89 - 32.02)} = - 0.006437 \quad \text{ต่อมิลลิเมตร}$$

กำลังของเลนส์ประกอบมีเครื่องหมายเป็นลบ แสดงให้เห็นว่าเลนส์ประกอบที่ทำจากแก้วฟลินท์ชนิดแน่นซึ่งมีค่าวีเป็น 32.02 มีลักษณะเป็นเลนส์เว้า ผลรวมทางพีชคณิตของกำลังของเลนส์ประกอบทั้งสองอัน ( $K'_D + K''_D$ ) มีค่าเป็น 0.005 ต่อมิลลิเมตร ซึ่งเท่ากับกำลังของเลนส์รวม ( $K_D$ ) ที่เป็นเลนส์รวมแสง

จากการที่หราบกำลังของเลนส์ประกอบแต่ละอัน จะสามารถเลือกผิวโค้งคู่หนึ่ง ๆ ที่จะให้กำลังของเลนส์ประกอบเป็นไปตามต้องการได้ ถ้าสมมติให้เลนส์ประกอบอันใดอันหนึ่งมีความโค้งของผิวเลนส์ทั้งสองผิวเท่ากันแล้วจะทำให้การคำนวณหาความโค้งของผิวอื่น ๆ สะดวกยิ่งขึ้น เช่น กำหนดให้เลนส์ประกอบที่ทำจากแก้วแบเรียมคราวน์ชนิดแน่น ซึ่งเป็นเลนส์นูน มีผิวนูนทั้งสองผิว และความโค้งของผิวทั้งสองของเลนส์ประกอบมีค่าเท่ากัน นั่นคือ $c'_2 = -c'_1$ จากสมการ (2.6)

$$c'_1 - c'_2 = \frac{K'_D}{n'_D - 1}$$

แทนค่าต่าง ๆ ลงในสมการ ได้ว่า

$$2c'_1 = \frac{0.011437}{1.62270-1}$$

$$c'_1 = 0.009183 \quad \text{ต่อมิลลิเมตร}$$

ดังนั้น $$c'_2 = -0.009183 \quad \text{ต่อมิลลิเมตร}$$

เนื่องจากเลนส์ประกอบที่ทำจากแก้วแบเรียมคราวน์ชนิดแน่น และแก้วฟลินท์ชนิดแน่นประกบกันเป็นเลนส์รงก์ ดังนั้นผิวที่ 1 ของเลนส์ประกอบที่ทำจากแก้วฟลินท์ชนิดแน่นซึ่งเป็นเลนส์เว้า และผิวที่ 2 ของเลนส์ประกอบที่ทำจากแก้วแบเรียมคราวน์ชนิดแน่นซึ่งเป็นเลนส์นูน จะมีความโค้งเดียวกัน ได้ว่า $c''_1 = c'_2$ และความโค้งของผิวที่ 2 ของเลนส์เว้าสามารถหาได้เช่นกัน โดยใช้สมการ (2.6)

$$c''_1 - c''_2 = \frac{K''_D}{n''_D - 1}$$

แทนค่าต่าง ๆ ลงในสมการ ได้ว่า

$$-0.009183 - c''_2 = \frac{-0.006437}{1.69865 - 1}$$

$$c''_2 = 0.000030 \quad \text{ต่อมิลลิเมตร}$$

ดังนั้นรูปร่างหนึ่งที่จะเป็นไปได้ของเลนส์รงค์อันนี้ คือ เลนส์นูนที่มีความโค้งของผิวหน้าและผิวหลังเป็น $+0.009183$ ต่อมิลลิเมตร และ $-0.009183$ ต่อมิลลิเมตร ตามลำดับ ประกบติดกับเลนส์เว้าที่มีความโค้งของผิวหน้าและผิวหลังเป็น $-0.009183$ ต่อมิลลิเมตร และ $+0.000030$ ต่อมิลลิเมตร ตามลำดับ

เลนส์อรงค์ที่มีทางยาวโฟกัสยังผล 200 มิลลิเมตร โดยทำจากแก้ว 2 ชนิด ที่กล่าวแล้วนี้ อาจสร้างให้มีรูปร่างแตกต่างไปจากที่กล่าวมาแล้วได้ เพื่อให้สะดวกในการคำนวณ เราอาจหาสูตรสำเร็จได้ดังนี้

จากสมการ (2.6)

$$c'_1 - c'_2 = \frac{K'_D}{n'_D - 1}$$

และ $$c''_1 - c''_2 = \frac{K''_D}{n''_D - 1}$$

เมื่อแทนค่า $K'_D$ $K''_D$, $n'_D$ และ $n''_D$ จะได้

$$c'_2 = c'_1 - 0.018366 \qquad (3.1ก.)$$

$$c''_2 = c''_1 + 0.009213$$

แต่เนื่องจากเลนส์อรงค์ที่จะสร้าง จะมีผิวหลังของเลนส์บูนกับผิวหน้าของเลนส์เว้าประกบติดกันสนิทหรือนั่นก็คือ

$$c''_1 = c'_2$$

ดังนั้น

$$c''_2 = c'_2 + 0.009213 \qquad (3.1ข.)$$

โดยที่ $c'_1$ เป็น ความโค้งของผิวที่ 1 ของเลนส์บูน

$c'_2$ เป็น ความโค้งของผิวที่ 2 ของเลนส์บูน หรือความโค้งของผิวที่ 1 ของเลนส์เว้า

$c''_2$ เป็น ความโค้งของผิวที่ 2 ของเลนส์เว้า

และเพื่อความสะดวกในการคำนวณต่อไป กำหนดให้ว่า

ผิวที่ 1 ของเลนส์บูน เป็นผิวที่ 1 ของเลนส์อรงค์ แทนด้วย $c_1$

ผิวที่ 2 ของเลนส์บูน ซึ่งมีความโค้งเดียวกับผิวที่ 1 ของเลนส์เว้า เป็นผิวที่ 2 ของเลนส์อรงค์ แทนด้วย $c_2$

ผิวที่ 2 ของเลนส์เว้าเป็นผิวที่ 3 ของเลนส์รวมกัน แทนด้วย $c_3$

ดังนั้น ความโค้งของผิวต่าง ๆ ของเลนส์รวมกันนี้ หาได้จากความสัมพันธ์ ซึ่งดัดแปลงจากสมการ (3.1 ก.) และ (3.1 ข.) ได้เป็น

$$c_2 = c_1 - 0.018366 \qquad (3.2ก.)$$

$$c_3 = c_2 + 0.009213 \qquad (3.2ข.)$$

จากนี้นำสมการ (3.2 ก.) และ(3.2 ข.) มาคำนวณหารูปร่างต่าง ๆ ของเลนส์ได้ดังแสดงไว้ในตารางที่ 3.1 ซึ่งแสดงค่าความโค้งของผิวเลนส์รวมกันที่มีทางยาวโฟกัส 200 มิลลิเมตร ประกอบด้วยเลนส์นูนที่ทำจากแก้วแบเรียมคราวน์ชนิดแน่น ซึ่งมีค่าดัชนีหักเหสำหรับแสงเหลือง ( $n_D$ ) เป็น 1.62270 และค่าวีเป็น 56.89 และเลนส์เว้าที่ทำจากแก้วฟลินท์ชนิดแน่น ซึ่งมีค่าดัชนีหักเหสำหรับแสงเหลือง ($n_D$) เป็น 1.69865 และค่าวีเป็น 32.02

สรุปได้ว่า เลนส์รวมกันสำหรับกอลลิเมเตอร์ ประกอบด้วยเลนส์นูนที่ทำจากแก้วแบเรียมคราวน์ชนิดแน่น มีกำลังของเลนส์เป็น +0.011437 ต่อมิลลิเมตร และเลนส์เว้าที่ทำจากแก้วฟลินท์ชนิดแน่นมีกำลังของเลนส์เป็น −0.006437 ต่อมิลลิเมตร เลนส์รวมกันนี้อาจมี $c_1$, $c_2$ และ $c_3$ ได้หลายชุด แต่ละชุดจะทำให้เลนส์รวมกันเป็นเลนส์นูนที่มีทางยาวโฟกัส 200 มิลลิเมตร ซึ่งเราต้องเลือกชุดที่ดีที่สุดมาใช้ต่อไป

ตารางที่ 3.1 ชุดความโค้งของผิวของเลนส์อรงค์สำหรับคอลลิเมเตอร์ มีหน่วยเป็นต่อมิลลิเมตร

| $C_1$ | $C_2$ | $C_3$ |
|---|---|---|
| + 0.009183 | − 0.009183 | + 0.000030 |
| + 0.008183 | − 0.010183 | − 0.000970 |
| + 0.007183 | − 0.011183 | − 0.001970 |
| + 0.006183 | − 0.012183 | − 0.002970 |
| + 0.005183 | − 0.013183 | − 0.003970 |
| + 0.004183 | − 0.014183 | − 0.004970 |
| + 0.003183 | − 0.015183 | − 0.005970 |
| + 0.002183 | − 0.016183 | − 0.006970 |
| + 0.001183 | − 0.017183 | − 0.007970 |
| + 0.000183 | − 0.018183 | − 0.008970 |
| − 0.000817 | − 0.019183 | − 0.009970 |
| − 0.001817 | − 0.020183 | − 0.010970 |
| − 0.002817 | − 0.021183 | − 0.011970 |
| − 0.003817 | − 0.022183 | − 0.012970 |
| − 0.004817 | − 0.023183 | − 0.013970 |
| − 0.005817 | − 0.024183 | − 0.014970 |

1.2 <u>การคำนวณและเลือกรูปร่างของเลนส์เพื่อลดความคลาดเอกรงค์</u>

ความคลาดเอกรงค์ที่ต้องคำนึงถึงในการออกแบบเลนส์อรงค์สำหรับคอลลิเมเตอร์ คือ ความคลาดทรงกลมและโคมา สำหรับเลนส์อรงค์นี้ทำการออกแบบให้โคมาเป็นศูนย์ แต่ความคลาดทรงกลมไม่มีทางที่จะทำให้เป็นศูนย์ได้ จึงพยายามให้เหลือน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้

เมื่อทราบชุดความโค้งของผิวเลนส์อรงค์คือ $c_1$ $c_2$ และ $c_3$ ดังแสดงในตารางที่ 3.1 แล้ว นำค่าเหล่านี้มาใช้ในการคำนวณแกะรอยรังสีใกล้แกนและแกะรอยรังสีมุขสำคัญใกล้แกน เพื่อที่จะคำนวณหาสัมประสิทธิ์ของความคลาดทรงกลมและสัมประสิทธิ์ของโคมา ซึ่งได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อที่ 7 ของบทที่ 2 ความโค้งของผิวเลนส์อรงค์ชุดหนึ่ง ๆ จะได้สัมประสิทธิ์ของความคลาดทรงกลมค่าหนึ่ง และสัมประสิทธิ์ของโคมาค่าหนึ่ง นำค่าความโค้งของผิวใดผิวหนึ่งของเลนส์กับสัมประสิทธิ์ของความคลาดทรงกลมและสัมประสิทธิ์ของโคมามาเขียนกราฟ จากกราฟสามารถเลือกค่าความโค้งของผิวเลนส์ได้ตามต้องการ

ในการคำนวณหาสัมประสิทธิ์ของความคลาดทรงกลม อาศัยการแกะรอยรังสีใกล้แกน จากที่กำหนดให้ว่า ลำแสงที่ผ่านผิวที่ 3 ของเลนส์อรงค์จะเป็นลำแสงขนาน ดังนั้น เพื่อความสะดวกในการแกะรอยรังสีใกล้แกน จึงจำเป็นต้องกลับผิวของเลนส์โดยกลับผิวที่ 3 ให้เป็นผิวที่ 1 และแกะรอยรังสีขนานจากทางซ้ายมายังทางขวา

เนื่องจากรูปร่างที่ใช้ในงานของเลนส์อรงค์นี้เป็นดังนี้ เส้นผ่าศูนย์กลางเป็น 50 มิลลิเมตร $c_1$ = +0.009183 ต่อมิลลิเมตร $c_2$ = -0.009183 ต่อมิลลิเมตร และ $c_3$ = +0.000030 ต่อมิลลิเมตร และให้ระยะระหว่างขั้วของผิวที่ 1 กับผิวที่ 2 เป็น 5 มิลลิเมตร ระยะระหว่างขั้วผิวที่ 2 กับผิวที่ 3 เป็น 5 มิลลิเมตร ดังนั้น รูปร่างที่ใช้ในการแกะรอยรังสีจะเป็นดังนี้ $c_1$ = -0.009183 ต่อมิลลิเมตร $c_2$ = +0.009183 ต่อมิลลิเมตร และ $c_3$ = -0.009183 ต่อมิลลิเมตร ระยะระหว่างขั้วของผิวที่ 1 กับผิวที่ 2 เป็น 5 มิลลิเมตร ระยะระหว่าง

ขั้วของผิวที่ 2 กับผิวที่ 3 เป็น 5 มิลลิเมตร เนื่องจากเลนส์รงค์นี้มีเส้นผ่าศูนย์กลางเป็น 50 มิลลิเมตร เพราะฉะนั้น ขอบของเลนส์อยู่สูงจากแกนมุขยสำคัญ ( h ) เป็น 25 มิลลิเมตร โดยใช้การแกะรอยรังสีใกล้แกน สามารถคำนวณหาสัมประสิทธิ์ของความคลาดทรงกลมของเลนส์รงค์ที่มีรูปร่างดังกล่าวได้จากตัวอย่างการคำนวณต่อไปนี้

การหักเหผ่านผิวที่ 1 ซึ่งมี ความโค้งของผิวเลนส์

( $c_1$ ) = - 0.000030 ต่อมิลลิเมตร

ดัชนีหักเหของตัวกลางหน้าผิวที่ 1

( $n_1$ ) ซึ่งเป็นอากาศ 1.0

ดัชนีหักเหของตัวกลางระหว่างผิวที่ 1 กับ

ผิวที่ 2 ( $n_{12}$ ) = 1.69865

ระยะระหว่างขั้วของผิวที่ 1 กับผิวที่ 2

( $t_{12}$ ) = 5 มิลลิเมตร

เนื่องจากรังสีขนานตกกระทบบนผิวที่ 1 ดังนั้น มุมซันของรังสีใกล้แกนที่ตกกระทบบนผิวที่ 1 มีค่าเป็น

$$u_1 = 0$$

$$h_1 c_1 = 25 \times (-0.000030) = 0.000750$$

จากสมการ (2.37) หาค่า A เมื่อรังสีใกล้แกนผ่านผิวที่ 1 ได้

$$A = n_1(h_1 c_1 - u_1)$$

$$= 1.0\,(-0.000750 - 0)$$

$$= -0.000750$$

และใช้สมการ (2.37) สามารถคำนวณหา มุมชันของรังสีหักเหเมื่อผ่านผิวที่ 1 ($u'_1$) ได้

$$u'_1 = h_1 c_1 - \frac{A_1}{n_{12}}$$

$$= -0.000750 - \frac{-0.000750}{1.69865}$$

$$= -0.000308$$

โดยใช้สมการ (2.20) ซึ่งเป็นสมการการย้ายผิว คำนวณหาความสูงของรังสีใกล้แกนตกกระทบบนผิวที่ 2 ($h_2$) ได้

$$h_2 = h_1 - t_{12} u'_1$$

$$= 25 - 5 \times (-0.0003080)$$

$$= +25.001540 \quad \text{มิลลิเมตร}$$

และได้ว่า $\Delta(\frac{u}{n})$ ของผิวที่ 1 เป็น

$$\Delta_1(\frac{u}{n}) = \frac{u'_1}{n_{12}} - \frac{u_1}{n_1}$$

$$= \frac{-0.000308}{1.698651} - \frac{0}{1.0}$$

$$= -0.000181$$

เพราะฉะนั้น เมื่อรังสีใกล้แกนหักเหผ่านผิวที่ 1 คำนวณได้ว่า

$$S_{I_1} = A_1^2 h_1 \Delta_1(\frac{u}{n})$$

$$= (-0.000750)^2 (+25)(-0.000181)$$

$$= -2.55 \times 10^{-9} \quad \text{มิลลิเมตร}$$

การหักเหผ่านผิวที่ 2 ซึ่งมี ความโค้งผิว ( $c_2$ ) = +0.009183 ต่อมิลลิเมตร

ดัชนีหักเหของตัวกลางระหว่างผิวที่ 1 กับผิวที่ 2 ( $n_{12}$ ) = 1.69865

ดัชนีหักเหของตัวกลางระหว่างผิวที่ 2 กับผิวที่ 3 ( $n_{23}$ ) = 1.62270

ระยะระหว่างขั้วของผิวที่ 2 กับผิวที่ 3 ( $t_{23}$ ) = 5 มิลลิเมตร

เนื่องจากมุมชันของรังสีหักเหเมื่อผ่านผิวที่ 1 มีค่าเท่ากับมุมชันของรังสีตกกระทบบนผิวที่ 2 ดังนั้น

$$u_2 = u_1' = -0.000308$$

และ

$$h_2 c_2 = +25.001540 \times (+0.009183)$$

$$= +0.229589$$

จากสมการ (2.37) หาค่า A เมื่อรังสีใกล้แกนผ่านผิวที่ 2 ได้

$$A_2 = n_{12}(h_2 c_2 - u_2)$$

$$= 1.69865\left[0.229589 - (-0.000308)\right]$$

$$= +0.390515$$

และใช้สมการ (2.37) คำนวณหามุมชันของรังสีหักเหเมื่อผ่านผิวที่ 2 ( $u_2'$ ) ได้

$$u_2' = h_2 c_2 - \frac{A_2}{n_{23}}$$

$$= +0.229589 - \frac{+0.390514}{1.62270}$$

$$= -0.011068$$

โดยใช้สมการ (2.20) คำนวณหาความสูงของรังสีใกล้แกนตกกระทบบนผิวที่ 3 ($h_3$) ได้

$$h_3 = h_2 - t_{23}\, u'_2$$

$$= +25.001540 - 5 \times (-0.011068)$$

$$= +25.056880 \quad \text{มิลลิเมตร}$$

และได้ว่า $\Delta(\frac{u}{n})$ ของผิวที่ 2 เป็น

$$\Delta_2(\frac{u}{n}) = \frac{u'_2}{n_{23}} - \frac{u_2}{n_{12}}$$

$$= \frac{-0.011068}{1.62270} - \frac{-0.000308}{1.69865}$$

$$= -0.006639$$

เพราะฉะนั้น เมื่อรังสีใกล้แกนหักเหผ่านผิวที่ 2 คำนวณได้ว่า

$$S_{I_2} = A_2^2 h_2 \Delta_2(\frac{u}{n})$$

$$= (+0.390514)^2 (+25.001540)(-0.006639)$$

$$= -0.025313 \quad \text{มิลลิเมตร}$$

การหักเหผ่านผิวที่ 3 ซึ่งมี ความโค้งของผิว ( $c_3$ ) = -0.009183 ต่อมิลลิเมตร

ดัชนีหักเหของตัวกลางหน้าผิวที่ 3 ( $n_{23}$ ) = 1.62270

ดัชนีหักเหของตัวกลางหลังผิวที่ 3 ( $n_3$ ) ซึ่งเป็นอากาศ = 1.0

เนื่องจากมุมซันของรังสีหักเหเมื่อผ่านผิวที่ 2 มีค่าเท่ากับมุมซันของรังสีตกกระทบบนผิวที่ 3 ดังนั้น

$$u_3 = u'_2 = -0.011068$$

และ

$$h_3c_3 = +25.056880 \times (-0.009183)$$

$$= -0.230097$$

จากสมการ (2.37) หาค่า A เมื่อรังสีใกล้แกนผ่านผิวที่ 3 ได้

$$A_3 = n_{23}(h_3c_3 - u_3)$$

$$= 1.62270\ (-0.230097)-(-0.011068)$$

$$= -0.355418$$

และใช้สมการ (2.37) คำนวณหามุมชันของรังสีหักเหเมื่อผ่านผิวที่ 3 ( $u'_3$ ) ได้

$$u'_3 = h_3c_3 - \frac{A_3}{n_3}$$

$$= -0.230097 - \frac{-0.355418}{1.0}$$

$$= +0.125321$$

และได้ว่า $\Delta_{(\frac{u}{n})}$ ของผิวที่ 3 เป็น

$$\Delta_3(\tfrac{u}{n}) = \frac{u'_3}{n_3} - \frac{u_3}{n_{23}}$$

$$= \frac{+0.125321}{1.0} - \frac{-0.011068}{1.62270}$$

$$= +0.132147$$

เพราะฉะนั้น เมื่อรังสีใกล้แกนหักเหผ่านผิวที่ 3 คำนวณได้ว่า

$$S_{I_3} = A_3^2\, h_3\, \Delta_3\,(\tfrac{u}{n})$$

$$= (-0.355418)^2(+25.056880)(+0.132147)$$

$$= +0.418276 \quad \text{มิลลิเมตร}$$

โดยใช้สมการ (2.41) คำนวณผลรวมของไซเดิลของความคลาดทรงกลมได้

$$S_I = S_{I_1} + S_{I_2} + S_{I_3}$$

$$= (-2.55\times10^{-9}) + (-0.025313) + (+0.418276)$$

$$= +0.392963 \quad \text{มิลลิเมตร}$$

ดังนั้น สัมประสิทธิ์ของความคลาดทรงกลมมีค่าเป็น

$$_0W_{40} = \frac{1}{8} S_1 = +0.049120 \quad \text{มิลลิเมตร}$$

ในการคำนวณหาสัมประสิทธิ์ของโคมา ต้องอาศัยการแกะรอยรังสีใกล้แกน และการแกะรอยรังสีมุขยสำคัญใกล้แกน และค่าบางค่าที่ใช้ในการหาสัมประสิทธิ์ของโคมา โดยอาศัยการแกะรอยรังสีใกล้แกน ได้คำนวณไว้แล้ว ส่วนการแกะรอยรังสีมุขยสำคัญใกล้แกนทำได้โดยแกะรอยจากขอบของสนามวัตถุผ่านจุดกึ่งกลางตัวจำกัดลำแสงแบบช่องเปิดของระบบ ซึ่งในที่นี้คือเลนส์รองค์นั่นเอง เนื่องจากในการแกะรอยรังสีใกล้แกนได้กลับผิวของเลนส์ และสามารถคำนวณได้ว่าภาพสุดท้ายเกิดที่ตำแหน่งซึ่งห่างจากผิวที่ 3 ไปทางขวาเป็นระยะ 198.89 มิลลิเมตร หรือห่างจากผิวที่ 1 ไปทางขวาเป็นระยะ 208.89 มิลลิเมตร และโดยกำหนดให้ขอบสนามอยู่สูงจากแกนเป็นระยะ 5 มิลลิเมตร ดังนั้น มุมซันของรังสีที่ตกกระทบบนจุดกึ่งกลางผิวที่ 1 ของเลนส์รองค์ที่ใช้แกะรอยรังสีมีค่าเป็น

$$-\bar{u}_1 = \frac{+5}{+208.89} = +0.023936$$

และสามารถคำนวณหาสัมประสิทธิ์ของโคมาของเลนส์รองค์ที่มีความโค้งของผิวเลนส์เป็น $c_1 = -0.000030$ ต่อมิลลิเมตร $c_2 = +0.009183$ ต่อมิลลิเมตร และ $c_3 = -0.009183$ ต่อมิลลิเมตร โดยวิธีการดังต่อไปนี้

การหักเหผ่านผิวที่ 1 ซึ่งมีความโค้ง ( $c_1$ ) = $-0.000030$ ต่อมิลลิเมตร

ดัชนีหักเหของตัวกลางหน้าผิวที่ 1 ( $n_1$ )
ซึ่งเป็นอากาศ = 1.0

ดัชนีหักเหของตัวกลางระหว่างผิวที่ 1 กับ
ผิวที่ 2 ( $n_{12}$ ) = 1.69865)

ระยะระหว่างขั้วของผิวที่ 1 กับผิวที่ 2
( $t_{12}$ ) = 5 มิลลิเมตร

มุมชันของรังสีมุขยสำคัญใกล้แกนตกกระทบบนผิวที่ 1 เป็น $\bar{u}_1 = -0.023936$ และเนื่องจากรังสีมุขยสำคัญใกล้แกน ผ่านจุดกึ่งกลางของผิวที่ 1 ดังนั้น ความสูงของรังสีมุขยสำคัญใกล้แกนตกกระทบบนผิวที่ 1 ของเลนส์ ( $\bar{h}_1$ ) มีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้น

$$\bar{h}_1 c_1 = 0 \times (-0.000030)$$

$$= 0$$

จากสมการ (2.38) หาค่า $\bar{A}$ เมื่อรังสีมุขยสำคัญใกล้แกนหักเหผ่านผิวที่ 1 ได้

$$\bar{A}_1 = n_1(\bar{h}_1 c_1 - \bar{u}_1)$$

$$= 1.0\left[0-(-0.023936)\right]$$

$$= +0.023936$$

และใช้สมการ (2.38) คำนวณหามุมชันของรังสีหักเห เมื่อผ่านผิวที่ 1 ( $\bar{u}_1'$ ) ได้

$$\bar{u}_1' = \bar{h}_1 c_1 - \frac{\bar{A}_1}{n_{12}}$$

$$\bar{u}_1' = 0 - \frac{+0.023936}{1.09865}$$

$$= -0.014091$$

โดยใช้สมการ (2.20) คำนวณหาความสูงของรังสีมุขยสำคัญใกล้แกนตกกระทบบนผิวที่ 2 ($\bar{h}_2$) ได้

$$\bar{h}_2 = \bar{h}_1 - t_{12}\bar{u}'_1$$

$$= 0 - 5(-0.014091)$$

$$= +0.070455 \quad \text{มิลลิเมตร}$$

เพราะฉะนั้น เมื่อรังสีมุขยสำคัญใกล้แกนหักเหผ่านผิวที่ 1 คำนวณได้ว่า

$$S_{I_1} = A_1\bar{A}_1h_1\Delta_1\left(\frac{u}{n}\right)$$

และจากการแกะรอยรังสีใกล้แกนผ่านผิวที่ 1 ได้ค่า $A_1 = -0.000750$ $h_1 = +25$ $\Delta_1\left(\frac{u}{n}\right) = -0.000181$

ดังนั้น

$$S_{II_1} = (-0.000750)(+0.023936)(+25)(-0.000181)$$

$$= +8.12\times10^{-8} \quad \text{มิลลิเมตร}$$

การหักเหผ่านผิวที่ 2 ซึ่งมี ความโค้งของผิว ($c_2$) = +0.009183 ต่อมิลลิเมตร

ดัชนีหักเหของตัวกลางระหว่างผิวที่ 1 กับผิวที่ 2 ($n_{12}$) = 1.69865

ดัชนีหักเหของตัวกลางระหว่างผิวที่ 2 กับผิวที่ 3 ($n_{23}$) = 1.62270

ระยะระหว่างขั้วของผิวที่ 2 กับผิวที่ 3 ($t_{23}$) = 5 มิลลิเมตร

เนื่องจากมุมชันของรังสีหักเหเมื่อผ่านผิวที่ 1 มีค่าเท่ากับมุมชันของรังสีตกกระทบบนผิวที่ 2 ดังนั้น

$$\bar{u}_2 = \bar{u}_1' = -0.014091$$

และ $$\bar{h}_2 c_2 = (+0.070455)(+0.009183)$$

$$= +0.000647$$

จากสมการ (2.38) หาค่า $\bar{A}$ เมื่อรังสีมุขยสำคัญใกล้แกนหักเหผ่านผิวที่ 2 ได้

$$\bar{A}_2 = n_{12}(\bar{h}_2 c_2 - \bar{u}_2)$$

$$= 1.69865 \left[-0.000647-(-0.014091)\right]$$

$$= +0.022837$$

และใช้สมการ (2.38) คำนวณหามุมชันของรังสีหักเห เมื่อผ่านผิวที่ 2 ( $\bar{u}_2'$ ) ได้

$$\bar{u}_2' = h_2 c_2 - \frac{\bar{A}_2}{n_{23}}$$

$$= +0.000647 - \frac{+0.022837}{1.62270}$$

$$= -0.013426$$

โดยใช้สมการ (2.20) คำนวณหาความสูงของรังสีมุขยสำคัญใกล้แกนตกกระทบบนผิวที่ 3 ($\bar{h}_3$) ได้

$$\bar{h}_3 = \bar{h}_2 - t_{23}\,\bar{u}_2'$$

$$= +0.070455-5(-0.013426)$$

$$= +0.137585 \quad \text{มิลลิเมตร}$$

เพราะฉะนั้น เมื่อรังสีมุขยสำคัญใกล้แกนหักเหผ่านผิวที่ 2 คำนวณได้ว่า

$$S_{II_2} = A_2 \bar{A}_2 h_2 \Delta_2 \left(\frac{u}{n}\right)$$

และจากการแกะรอยรังสีใกล้แกนผ่านผิวที่ 2 ได้ค่า $A_2 = +0.390514$

$h_2 = +25.001540$ $\Delta_2(\frac{u}{n}) = -0.006639$

ดังนั้น

$$S_{II_1} = (+0.390514)(+0.022837)(+25.001540)(-0.006639)$$

$$= -0.001480 \quad \text{มิลลิเมตร}$$

การหักเหผ่านผิวที่ 3 ซึ่งมี ความโค้งของผิว ( $c_3$ ) = -0.009183 ต่อมิลลิเมตร

ดัชนีหักเหของตัวกลางหน้าผิวที่ 3 ( $n_{23}$ ) = 1.62270

ดัชนีหักเหของตัวกลางหลังผิวที่ 3 ( $n_3$ ) ซึ่งเป็นอากาศ = 1.0

เนื่องจากมุมซันของรังสีหักเหเมื่อผ่านผิวที่ 2 มีค่าเท่ากับมุมซันของรังสีตกกระทบบนผิวที่ 3 ดังนั้น

$$\bar{u}_3 = \bar{u}'_2 = -0.013426$$

และ $$\bar{h}_3 c_3 = (+0.137585)(-0.009183)$$

$$= -0.001263$$

จากสมการ (2.38) หาค่า $\bar{A}$ เมื่อรังสีมุขยสำคัญใกล้แกนหักเหผ่านผิวที่ 3 ได้

$$\bar{A}_3 = n_{23}(\bar{h}_3 c_3 - \bar{u}_3)$$

$$= 1.62270\left[-0.001263-(-0.013426)\right]$$

$$= +0.019737$$

เพราะฉะนั้น เมื่อหักเหรังสีมุขยสำคัญใกล้แกนผ่านผิวที่ 3 คำนวณได้ว่า

$$S_{II_3} = A_3\bar{A}_3h_3\Delta_3\left(\frac{u}{n}\right)$$

และจากการแกะรอยรังสีใกล้แกนผ่านผิวที่ 3 ได้ค่า $A_3 = -0.355418$

$h_3 = +24.056880$ $\quad \Delta_3\left(\frac{u}{n}\right) = +0.132147$

ดังนั้น
$$S_{II_3} = (-0.355418)(+0.019737)(+25.056880)(0.132147)$$
$$= -0.023228 \quad \text{มิลลิเมตร}$$

และใช้สมการ (2.42) คำนวณหาผลรวมไซเดิลของโคมา ได้ว่า

$$S_{II} = S_{II_1} + S_{II_2} + S_{II_3}$$
$$= (+8.12\times10^{-8}) + (-0.001480) + (-0.023228)$$
$$= -0.024708 \quad \text{มิลลิเมตร}$$

ดังนั้น สัมประสิทธิ์ของโคมา มีค่าเป็น

$$_1W_{31} = \frac{1}{2}S_{II} = -0.012354 \quad \text{มิลลิเมตร}$$

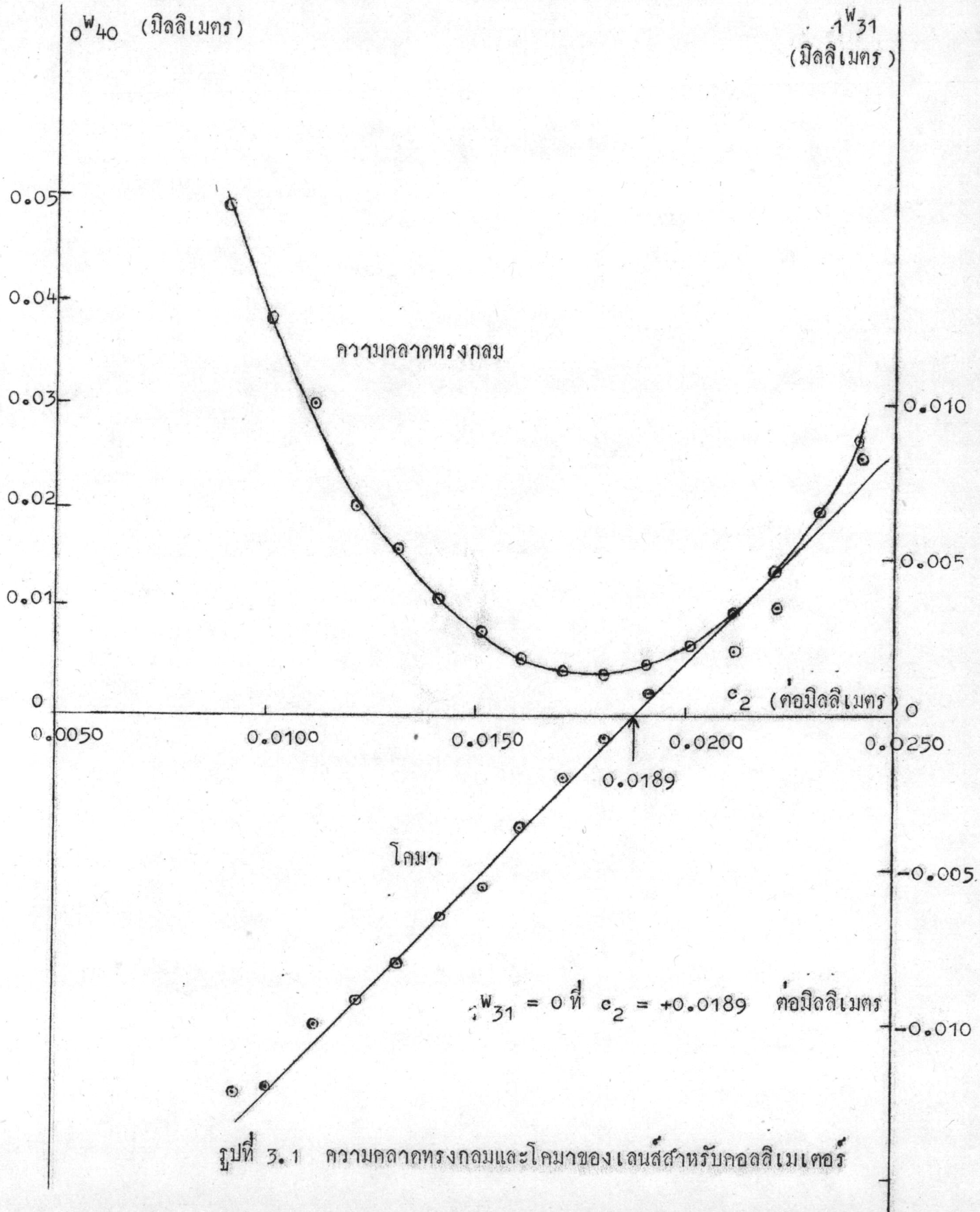
ดังนั้น เลนส์รองค์ซึ่งมีความโค้งของผิวเป็น $c_1 = -0.000030$ ต่อมิลลิเมตร $c_2 = +0.009183$ ต่อมิลลิเมตร และ $c_3 = -0.009183$ ต่อมิลลิเมตร มีสัมประสิทธิ์ของความคลาดทรงกลมเป็น +0.049120 มิลลิเมตร และสัมประสิทธิ์ของโคมาเป็น -0.012354 มิลลิเมตร

จากตัวอย่างการคำนวณที่ได้แสดงไว้แล้ว สามารถจะหาสัมประสิทธิ์ของความคลาดทรงกลมและสัมประสิทธิ์ของโคมาของเลนส์รองค์ที่มีรูปร่างต่าง ๆ ตามตารางที่ 3.1 ได้ ค่าทั้งหมดได้แสดงไว้ในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 สัมประสิทธิ์ของความคลาดทรงกลม และโคมาของเลนส์รองค์สำหรับคอลลิเมเตอร์

| $c_1$ (ต่อมิลลิเมตร) | $c_2$ (ต่อมิลลิเมตร) | $c_3$ (ต่อมิลลิเมตร) | $0^W_{40}$ (มิลลิเมตร) | $1^W_{31}$ (มิลลิเมตร) |
|---|---|---|---|---|
| -0.000030 | +0.009183 | -0.009183 | +0.049120 | -0.012354 |
| +0.000970 | +0.010183 | -0.008183 | +0.038843 | -0.012232 |
| +0.001970 | +0.011183 | -0.007183 | +0.030030 | -0.010809 |
| +0.002970 | +0.012183 | -0.006183 | +0.020706 | -0.009806 |
| +0.003970 | +0.013183 | -0.005183 | +0.016491 | -0.007970 |
| +0.004970 | +0.014183 | -0.004183 | +0.011643 | -0.006549 |
| +0.005970 | +0.015183 | -0.003183 | +0.008008 | -0.005124 |
| +0.006970 | +0.016183 | -0.002183 | +0.005551 | -0.003695 |
| +0.007970 | +0.017183 | -0.001183 | +0.004239 | -0.002256 |
| +0.008970 | +0.018183 | -0.000183 | +0.004056 | -0.000806 |
| +0.009970 | +0.019183 | +0.000817 | +0.004980 | +0.000657 |
| +0.010970 | +0.020183 | +0.001817 | +0.006983 | +0.002134 |
| +0.011070 | +0.021183 | +0.002817 | +0.010206 | +0.003634 |
| +0.012970 | +0.022183 | +0.003817 | +0.014385 | +0.005153 |
| +0.013970 | +0.023183 | +0.004817 | +0.019750 | +0.006696 |
| +0.014970 | +0.024183 | +0.005817 | +0.026258 | +0.008266 |

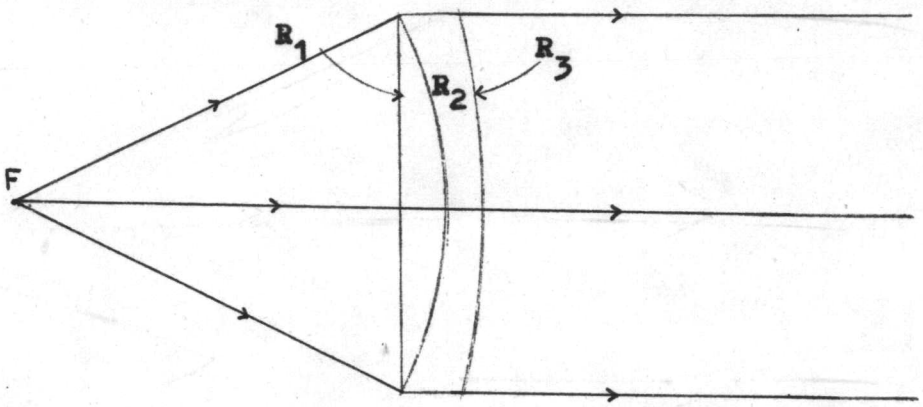
เมื่อนำค่าความโค้งของผิวที่ 2 ของเลนส์รองค์กับสัมประสิทธิ์ของความคลาดทรงกลม และสัมประสิทธิ์ของโคมาเขียนกราฟ กราฟระหว่างความโค้งของผิวเลนส์กับสัมประสิทธิ์ของความคลาดทรงกลม มีลักษณะเป็นพาราโบลา และกราฟระหว่างความโค้งของผิวเลนส์กับสัมประสิทธิ์ของโคมามีลักษณะเป็นเส้นตรง ดังแสดงในรูปที่ 3.1




รูปที่ 3.1 ความคลาดทรงกลมและโคมาของเลนส์สำหรับคอลลิเมเตอร์

จากรูปจะเห็นว่า ขณะที่ความคลาดทรงกลมมีค่าต่ำสุดเป็น +0.0039 มิลลิเมตร เลนส์จะมีโคมาเป็น +0.0013 มิลลิเมตร และขณะที่โคมาเป็นศูนย์ ความคลาดทรงกลมมีค่าเป็น +0.0045 มิลลิเมตร ซึ่งมากกว่าค่าต่ำสุดเล็กน้อย ดังนั้น การเลือกรูปร่างของเลนส์รงค์นี้ จึงเลือกตรงจุดที่สัมประสิทธิ์ของโคมาเป็นศูนย์ ณ ที่นั้น ความโค้งของผิวที่ 2 ( $c_2$ ) ของเลนส์รงค์เป็น +0.0189 ต่อมิลลิเมตร และเมื่อกลับเลนส์ให้เป็นรูปร่างที่ใช้งานจริง ๆ ความโค้งของผิวที่ 2 ( $c_2$ ) ของเลนส์รงค์เป็น -0.0189 ต่อมิลลิเมตร โดยใช้สมการ (3.2 ก.) และสมการ (3.2 ข.) สามารถคำนวณหาความโค้งของผิวที่ 1 ( $c_1$ ) และผิวที่ 3 ( $c_3$ ) ของเลนส์รงค์ได้เป็น -0.000734ต่อมิลลิเมตร และ-0.009687 ต่อมิลลิเมตร ตามลำดับ เนื่องจากรัศมีความโค้งเป็นส่วนกลับกับความโค้งของผิว ดังนั้น เลนส์รงค์สำหรับคอลลิเมเตอร์มีรูปร่างตามต้องการดังนี้ รัศมีความโค้งของผิวที่ 1 เป็น -1873 มิลลิเมตร รัศมีความโค้งของผิวที่ 2 เป็น -52.9 มิลลิเมตร และรัศมีความโค้งของผิวที่ 3 เป็น -103.2 มิลลิเมตร

สรุปได้ว่า เลนส์รงค์สำหรับคอลลิเมเตอร์ที่ต้องการประกอบด้วยเลนส์บูนซึ่งทำจากแก้วแบเรียมคราวน์ชนิดแน่น มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร รัศมีความโค้งของผิวที่ 1 และผิวที่ 2 เป็น -1873 มิลลิเมตร และ -52.9 มิลลิเมตร ตามลำดับ ระยะระหว่างขั้วของผิวโค้งทั้งสองเป็น 5 มิลลิเมตร และเลนส์เว้าซึ่งทำจากแก้วฟลินท์ชนิดแน่นมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเป็น 50 มิลลิเมตร รัศมีความโค้งของผิวที่ 1 และผิวที่ 2 เป็น -52.9 มิลลิเมตร และ -103.2 มิลลิเมตร ตามลำดับ ระยะระหว่างขั้วของผิวโค้งทั้งสองเป็น 5 มิลลิเมตร มีลักษณะดังรูปที่ 3.2 เลนส์รงค์ที่ได้จะไม่มีโคมาเหลืออยู่ มีความคลาดทรงกลมเหลืออยู่เล็กน้อย โดย $_0W_{40}$ = +0.0045 มิลลิเมตร เป็นค่าที่ใกล้เคียงกับค่าความคลาดทรงกลมต่ำสุด ที่เลนส์นี้จะมีได้ ( $_0W_{40}$ ต่ำสุด = +0.0039 มิลลิเมตร)




รูปที่ 3.2 รูปร่างที่คำนวณได้ของเลนส์อรงค์สำหรับคอลลิเมเตอร์

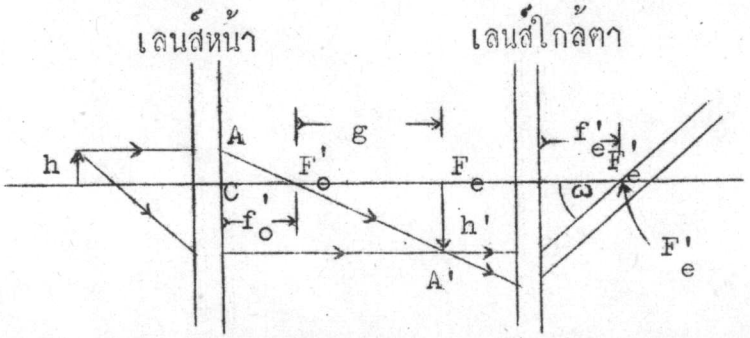
( โดยมี $R_1$ = -1873 มิลลิเมตร

$R_2$ = -52.9 มิลลิเมตร

$R_3$ = -103.2 มิลลิเมตร)

2. <u>การออกแบบกล้องจุลทัศน์เชิงซ้อน</u>[1,2,7]

กล้องจุลทัศน์เชิงซ้อนเป็นทัศนอุปกรณ์ที่ให้กำลังขยายสูง เหมาะสำหรับใช้ดูวัตถุที่มีขนาดเล็ก อุปกรณ์นี้ประกอบด้วยเลนส์นูน 2 ระบบ วางห่างกันพอเหมาะ ดังรูปที่ 3.3 $F_o$ และ $F'_o$ เป็นจุดโฟกัสปฐมภูมิ และจุดโฟกัสทุติยภูมิของเลนส์หน้าของกล้องจุลทัศน์เชิงซ้อน ตามลำดับ $f'_o$ เป็นทางยาวโฟกัสทุติยภูมิของเลนส์หน้า $F_e$ และ $F'_e$




รูปที่ 3.3 หลักการของกล้องจุลทัศน์เชิงซ้อน

เป็นจุดโฟกัสปฐมภูมิ และจุดโฟกัสทุติยภูมิของเลนส์ใกล้ตาตามลำดับ $f_e$ เป็นทางยาวโฟกัสทุติยภูมิของเลนส์ใกล้ตา g เป็นระยะห่างระหว่างจุดโฟกัสทุติยภูมิของเลนส์หน้ากับจุดโฟกัสปฐมภูมิของเลนส์ใกล้ตา บางครั้งเรียกว่าความยาวกล้องเชิงทัศนศาสตร์ h เป็นความสูงของวัตถุที่วางไว้ข้างหน้าของเลนส์หน้า h' เป็นความสูงของภาพจริงหัวกลับของวัตถุที่เกิดจากเลนส์หน้า $\omega$ เป็นมุมรองรับที่นัยน์ตาของภาพสุดท้าย รูปที่ 3.3 แสดงให้เห็นภาพจริงหัวกลับสูง h' ซึ่งได้จากวัตถุสูง h วางอยู่หน้าเลนส์หน้าของกล้องจุลทัศน์ ภาพจริงหัวกลับนี้ถูกขยายต่อไปอีกด้วยเลนส์ใกล้ตา จนได้ภาพสุดท้าย

พิจารณาจากกรณีที่ภาพสุดท้ายอยู่ที่ตำแหน่งอนันต์ ซึ่งจะได้ก็ต่อเมื่อภาพจริงหัวกลับที่ได้จากเลนส์หน้าอยู่ที่ตำแหน่งระนาบโฟกัสปฐมภูมิของเลนส์ใกล้ตาพอดี ทางเดินของรังสีดังได้แสดงในรูปที่ 3.3 เห็นได้ว่ามุมที่มองภาพสุดท้ายเป็น $\omega = h'/f_e'$ โดยที่ $f_e'$ คือ ทางยาวโฟกัสทุติยภูมิของเลนส์ใกล้ตา และเนื่องจากสามเหลี่ยม $AF_o'C$ กับสามเหลี่ยม $A'F_o'F_e$ เป็นสามเหลี่ยมคล้าย ได้ว่า

$$\frac{h'}{h} = -\frac{g}{f_o'} \qquad (3.3)$$

ดังนั้น มุมรองรับภาพสุดท้าย ณ ตำแหน่งตา เป็น $\omega = hg/f_o'f_e'$ กำลังขยายของทัศนอุปกรณ์ ( M ) ใด ๆ หาได้จาก

$$M = \frac{\text{มุมรองรับภาพสุดท้าย ณ ตำแหน่งตา เมื่อมองวัตถุผ่านทัศนอุปกรณ์}}{\text{มุมรองรับวัตถุ ณ ตำแหน่งตา เมื่อมองวัตถุด้วยตาเปล่า}}$$

ดังนั้น กำลังขยายของกล้องจุลทัศน์ เขียนได้เป็น

$$M = \frac{-hg/f_o'f_e'}{h/D_v}$$

$$M = -\frac{gD_v}{f_o'f_e'} = -\left(\frac{g}{f_o'}\right)\left(\frac{D_v}{f_e'}\right) \qquad (3.4)$$

โดยที่ $D_v$ เป็นระยะใกล้ที่สุดของการมองเห็นได้ชัด ( least distance of distinct

vision ) ซึ่งสำหรับคนที่มีสายตาปกติ มีค่าเป็น 250 มิลลิเมตร สมการ (3.4) แสดงให้เห็นว่ากำลังขยายของกล้องจุลทัศน์เป็นผลคูณของกำลังขยายปฐมภูมิ ซึ่งได้จากเลนส์หน้ากับกำลังขยายของเลนส์ใกล้ตานั่นเอง เครื่องหมายลบที่ติดอยู่แสดงว่า ภาพสุดท้ายยังคงเป็นภาพจริงหัวกลับ ดังนั้น สมการ (3-4) เขียนให้อยู่ในรูปของผลคูณของกำลังขยายของเลนส์หน้ากับกำลังขยายของเลนส์ใกล้ตาได้ดังนี้

$$M = -M_o \times M_e \qquad (3.5)$$

โดยที่ $M_o$ เป็นกำลังขยายของเลนส์หน้า มีค่าเท่ากับ $\varepsilon/f'_o$

$M_e$ เป็นกำลังขยายของเลนส์ใกล้ตา มีค่าเท่ากับ $D_v/f'_e$ } (3.5')

งานวิจัยนี้ทำการออกแบบและสร้างกล้องจุลทัศน์เชิงซ้อนที่มีกำลังขยายเป็น 20 เท่า โดยกำหนดให้ กำลังขยายของเลนส์หน้า ( $M_o$ ) เป็น 2 เท่า และกำลังขยายของเลนส์ใกล้ตา ( $M_e$ ) เป็น 10 เท่า และความยาวกล้องเชิงทัศนศาสตร์เป็น 50 มิลลิเมตร

สำหรับเลนส์หน้า เมื่อกำหนดค่ากำลังขยายและความยาวกล้องเชิงทัศนศาสตร์แล้ว สามารถหาทางยาวโฟกัส ( $f'_o$ ) ของเลนส์หน้าได้ โดยใช้สมการ (3.5') ได้ว่า

$$2 = \frac{50}{f'_o}$$

เพราะฉะนั้น $f'_o = 25$ มิลลิเมตร

นั่นคือ ทางยาวโฟกัสของเลนส์หน้าของกล้องจุลทัศน์เป็น 25 มิลลิเมตร

ส่วนเลนส์ใกล้ตา คำนวณหาทางยาวโฟกัสได้โดยใช้สมการ (3.5') เช่นกัน ได้ว่า

$$10 = \frac{250}{f'_e}$$

เพราะฉะนั้น $f'_e = 25$ มิลลิเมตร

นั่นคือ ทางยาวโฟกัสของเลนส์ใกล้ตาของกล้องจุลทัศน์เป็น 25 มิลลิเมตร

การออกแบบและสร้างเลนส์หน้าและเลนส์ใกล้ตานี้ จะสมมติว่าเลนส์แต่ละอันมีลักษณะเป็นเลนส์บาง ดังนั้น ในการหาระยะวัตถุของเลนส์หน้า เมื่อต้องการให้ภาพจริงที่เกิดจากเลนส์หน้าไปอยู่ที่ตำแหน่งระนาบโฟกัสปฐมภูมิของเลนส์ใกล้ตา ซึ่งอยู่หลังเลนส์หน้าเป็นระยะ 75 มิลลิเมตร หาได้โดยใช้สมการ (1.2)

$$\frac{1}{25} = \frac{1}{75} - \frac{1}{l}$$

เพราะฉะนั้น $l = -37.50$ มิลลิเมตร

นั่นคือ ระยะใช้งาน ( working distance ) ของกล้องจุลทัศน์นี้เป็น 37.50 มิลลิเมตร

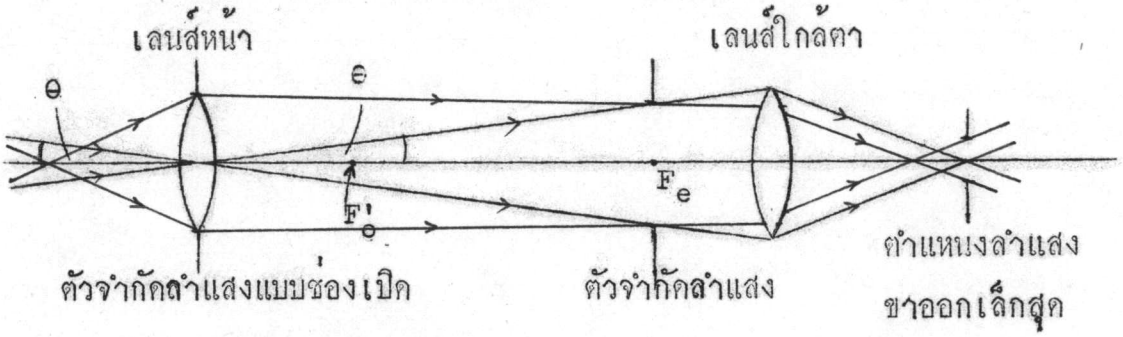
ตำแหน่งลำแสงขาออกเล็กสุดของกล้องจุลทัศน์ คือ ตำแหน่งภาพของตัวจำกัดลำแสงแบบช่องเปิด ( aperture stop ) ที่เกิดจากเลนส์ใกล้ตา ในกรณีนี้ช่องเปิดจะอยู่ที่เลนส์หน้า ซึ่งอยู่หน้าเลนส์ใกล้ตาเป็นระยะ 100 มิลลิเมตร โดยใช้สมการ(1.2) หาตำแหน่งภาพได้

$$\frac{1}{25} = \frac{1}{l'} - \frac{1}{-100}$$

เพราะฉะนั้น $l' = 33.33$ มิลลิเมตร

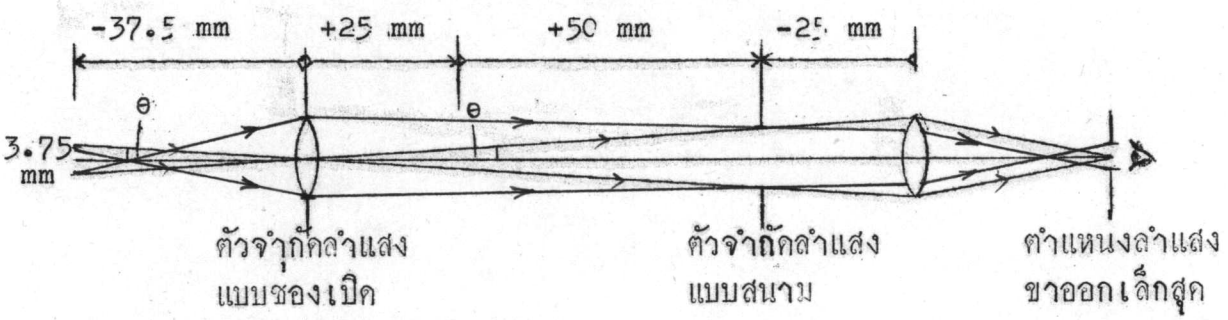
นั่นคือ ตำแหน่งลำแสงขาออกเล็กสุดอยู่ห่างจากเลนส์ใกล้ตาไปทางขวาเป็นระยะ 33.33 มิลลิเมตร

เพื่อจำกัดสนามของภาพที่เห็นโดยกล้องจุลทัศน์ ต้องใส่ตัวจำกัดลำแสงแบบสนาม ( field stop ) ณ ตำแหน่งของระนาบโฟกัสปฐมภูมิของเลนส์ใกล้ตา ซึ่งตำแหน่งนี้ก็คือ ตำแหน่งวัตถุของเลนส์ใกล้ตานั่นเอง ขนาดของตัวจำกัดลำแสงแบบสนาม ต้องพอเหมาะที่จะให้แสงเข้าเลนส์ใกล้ตาได้เต็มหน้าเลนส์ ดังแสดงในรูปที่ 3.4 มุม $\theta$ ในรูปคือมุมครึ่งของสนามทางด้านวัตถุ




รูปที่ 3.4 สนามของการเห็นของกล้องจุลทัศน์

กรณีของกล้องจุลทัศน์ที่สร้างขึ้นนี้ ตัวจำกัดลำแสงแบบสนามจะอยู่หลังเลนส์หน้าเป็นระยะ 75 มิลลิเมตร และอยู่หน้าเลนส์ใกล้ตาเป็นระยะ 25 มิลลิเมตร ขนาดของเลนส์ใกล้ตาเป็น 10 มิลลิเมตร เพื่อให้แสงที่ผ่านจุดกึ่งกลางของเลนส์หน้าตกที่ขอบของเลนส์ใกล้ตาได้พอดี ต้องคำนวณหาขนาดของตัวจำกัดลำแสงแบบสนาม ซึ่งทำได้ง่าย ๆ ดังนี้




รูปที่ 3.5 สนามของการเห็นของกล้องจุลทัศน์เชิงซ้อนที่สร้างขึ้น

$$\frac{\text{ขนาดของตัวจำกัดลำแสงแบบสนาม}}{10} = \frac{75}{100}$$

ดังนั้น ขนาดของตัวจำกัดลำแสงแบบสนาม มีค่าเป็น 7.5 มิลลิเมตร

นั่นก็คือ ขนาดของมุมครึ่งของสนามทางด้านวัตถุ ( $\theta$ ) $= \frac{7.5}{2 \times 75}$ เรเดียน

$= 0.05$ เรเดียน

$= 2.86$ องศา

เมื่อระยะใช้งานของกล้องจุลทัศน์นี้เป็น 37.50 มิลลิเมตร แสดงว่าวัตถุที่อยู่ที่ระยะใช้งานต้องมีความสูงจากแกนได้มากสุดเป็น 1.87 มิลลิเมตร กล้องจุลทัศน์จะรับภาพได้หมด

สรุปได้ว่า กล้องจุลทัศน์เชิงซ้อนที่ออกแบบนี้ มีกำลังขยายเป็น 20 เท่า โดยที่ทางยาวโฟกัสของเลนส์หน้าเป็น 25 มิลลิเมตร ทางยาวโฟกัสของเลนส์ใกล้ตาเป็น 25 มิลลิเมตร ความยาวกล้องเชิงทัศนศาสตร์เป็น 50 มิลลิเมตร ระยะใช้งานของกล้องเป็น 37.50 มิลลิเมตร มุมครึ่งของสนามทางด้านวัตถุเป็น 2.86 องศา

2.1 <u>การคำนวณออกแบบรูปร่างของเลนส์หน้าและเลนส์ใกล้ตา</u> จากการคำนวณในตอนต้นของหัวข้อที่ 2 ในบทนี้ ได้ว่า ทางยาวโฟกัสของเลนส์หน้าและเลนส์ใกล้ตาต่างมีค่าเป็น 25 มิลลิเมตร และกำหนดด้วยว่าจะทำให้เป็นเลนส์อรงค์ ซึ่งประกอบด้วยเลนส์นูนและเลนส์เว้าที่ทำด้วยแก้วต่างชนิด แก้วที่มีอยู่จะนำมาใช้ได้มีแก้วแบเรียมคราวน์ชนิดแน่นมีดัชนีหักเหสำหรับแสงเหลือง ( $n_D$ ) เป็น 1.62270 และค่าวีเป็น 56.89 และทำจากแก้วฟลินท์ชนิดแน่น ซึ่งมีค่าดัชนีหักเหสำหรับแสงเหลือง ( $n_D$ ) เป็น 1.69865 และ

ค่าวีเป็น 32.02 ดังนั้น เลนส์หน้าและเลนส์ใกล้ตาต่างก็จะประกอบเลนส์นูนที่มีลักษณะเหมือนกัน และเลนส์เว้าที่มีลักษณะเหมือนกันด้วย

จากที่ได้ทางยาวโฟกัสของเลนส์รองค์ ( $f_D$ ) มีค่าเป็น +25 มิลลิเมตร ดังนั้น กำลังของเลนส์รองค์ ( $K_D$ ) $= \frac{1}{f_D} = \frac{1}{+25} =$ +0.04 ต่อมิลลิเมตร การคำนวณนี้ จะคำนวณถึงตัวเลขหลังจุดทศนิยมตำแหน่งที่ 6 โดยสมการ (2.12) สามารถหากำลังของเลนส์ประกอบแต่ละอันของเลนส์รองค์ได้ โดยทั่วไปแล้วเลนส์ของกล้องจุลทัศน์เชิงซ้อนนิยมใช้เลนส์เว้าเข้าหาวัตถุ เพราะขณะที่ภาพอยู่ที่ตำแหน่งเดียวกัน ตำแหน่งวัตถุหน้าเลนส์เว้าของเลนส์รองค์จะใกล้กว่าตำแหน่งวัตถุหน้าเลนส์นูนของเลนส์รองค์ ดังนั้น กำลังของเลนส์ประกอบที่ทำจากแก้วฟลินท์ชนิดแน่นซึ่งมีค่าวีเป็น 32.02 มีค่าเป็น

$$K'_D = \frac{1}{25} \times \frac{32.02}{32.02 - 56.89} = -0.051500 \quad \text{ต่อมิลลิเมตร}$$

กำลังของเลนส์มีเครื่องหมายเป็นลบ แสดงให้เห็นว่าเลนส์ที่ทำจากแก้วฟลินท์ชนิดแน่นซึ่งมีค่าวีเป็น 32.02 มีลักษณะเป็นเลนส์เว้า ส่วนกำลังของเลนส์ประกอบที่ทำจากแก้วแบเรียมคราวส์ชนิดแน่น ซึ่งมีค่าวีเป็น 56.86 มีค่าเป็น

$$K''_D = -\frac{1}{25} \times \frac{56.89}{32.02 - 56.89} = +0.091500 \quad \text{ต่อมิลลิเมตร}$$

กำลังของเลนส์มีเครื่องหมายเป็นบวก แสดงให้เห็นว่าเลนส์ที่ทำจากแก้วแบเรียมคราวน์ชนิดแน่น ซึ่งมีค่าวีเป็น 56.89 มีลักษณะเป็นเลนส์นูน ผลรวมทางพีชคณิตของกำลังของเลนส์ประกอบทั้งสองอันมีค่าเป็น 0.04 ต่อมิลลิเมตร คือ กำลังของเลนส์รวมซึ่งเป็นเลนส์รองค์

เมื่อทราบกำลังของเลนส์ประกอบแต่ละอันก็สามารถเลือกผิวโค้งคู่หนึ่ง ๆ ที่จะให้กำลังของเลนส์เป็นไปตามต้องการได้ สมมติให้ความโค้งของผิวที่ 1 ของเลนส์เว้ามีค่าเป็นศูนย์ โดยใช้สมการ (2.6)

$$C'_1 - C'_2 = \frac{K'_D}{n'_D - 1}$$

แทนค่าต่าง ๆ ลงในสมการ ได้ว่า

$$-C'_2 = \frac{-0.051500}{1.69865 - 1}$$

เพราะฉะนั้น $C'_2 = +0.073713$ ต่อมิลลิเมตร

เนื่องจากเลนส์ประกอบที่ทำจากแก้วฟลินท์ชนิดแน่น และแก้วแบเรียมคราวน์ชนิดแน่นถูกประกบเข้าด้วยกันเป็นเลนส์รงค์ ดังนั้นผิวที่ 1 ของเลนส์ประกอบที่ทำจากแก้วแบเรียมคราวน์ชนิดแน่น ซึ่งเป็นเลนส์นูนและผิวที่ 2 ของเลนส์ประกอบที่ทำจากแก้วฟลินท์ชนิดแน่น ซึ่งเป็นเลนส์เว้ามีความโค้งเดียวกัน ได้ว่า $C''_1 = C''_2$ และความโค้งของผิวที่ 2 ของเลนส์นูนสามารถหาได้เช่นกันโดยใช้สมการ (2.6)

$$C''_1 - C''_2 = \frac{K''_D}{n''_D - 1}$$

แทนค่าต่าง ๆ ลงในสมการ ได้ว่า

$$+0.073713 - C''_2 = \frac{0.091500}{1.62270-1}$$

$$C''_2 = -0.073228 \quad \text{ต่อมิลลิเมตร}$$

ดังนั้น รูปร่างหนึ่งที่เป็นไปได้ของเลนส์รงค์นี้คือ เลนส์เว้า มีความโค้งของผิวหน้าและผิวหลังเป็นศูนย์ และ + 0.073713 ต่อมิลลิเมตร ตามลำดับ เลนส์นูนมีความโค้งของผิวเป็น + 0.073713 ต่อมิลลิเมตร และ −0.073228 ต่อมิลลิเมตร

แต่เลนส์รงค์ที่มีทางยาวโฟกัสค่าหนึ่งที่ต้องการสามารถมีเลนส์ประกอบที่มีความโค้งของผิวเลนส์ได้หลายชุด หรือหลายรูปร่างนั่นเอง เพื่อความสะดวกในการคำนวณหาความโค้งของผิวเลนส์ประกอบที่ทำจากแก้วฟลินท์ชนิดแน่น และแก้วแบเรียมคราวน์ชนิดแน่น ซึ่งนำไปประกอบกันเป็นเลนส์รงค์ จะหาสมการง่าย ๆ ได้จากสมการ (2.6) ซึ่งโดยการแทนค่า $K'_D$, $K''_D$, $n'_D$ และ $n''_D$ ลงใน สมการจะได้

$$c_2' = c_1' + 0.073713 \qquad (3.6\text{ก.})$$

และ $$c_2'' = c_2' + 0.146941 \qquad (3.6\text{ข.})$$

โดยที่ $c_1$ เป็นความโค้งของผิวที่ 1 ของเลนส์เว้า

$c_2'$ เป็นความโค้งของผิวที่ 2 ของเลนส์เว้า

$c_2''$ เป็นความโค้งของผิวที่ 2 ของเลนส์นูน

และเพื่อความสะดวกในการคำนวณต่อไป กำหนดให้ว่า

ผิวที่ 1 ของเลนส์เว้า เป็นผิวที่ 1 ของเลนส์ แทนด้วย $c_1$

ผิวที่ 2 ของเลนส์เว้า ซึ่งมีความโค้งเดียวกับผิวที่ 1 ของเลนส์นูน เป็นผิวที่ 2 ของเลนส์อรงค์ แทนด้วย $c_2$

ผิวที่ 2 ของเลนส์นูนเป็นผิวที่ 3 ของเลนส์อรงค์ แทนด้วย $c_3$

ดังนั้น จากสมการ (3.6 ก.) และสมการ (3.6 ข.) เขียนได้ว่า

$$c_2 = c_1 + 0.073713 \qquad (3.7\text{ก.})$$

$$c_3 = c_2 - 0.146941 \qquad (3.7\text{ข.})$$

ค่าความโค้งชุดแรกของเลนส์อรงค์ที่หาไว้แล้ว เป็น

ความโค้งของผิวที่ 1 ( $c_1$ ) เป็น 0 ต่อมิลลิเมตร

ความโค้งของผิวที่ 2 ( $c_2$ ) เป็น +0.073713 ต่อมิลลิเมตร

ความโค้งของผิวที่ 3 ( $c_3$ ) เป็น −0.073228 ต่อมิลลิเมตร

โดยการเพิ่มค่าความโค้งของผิวที่ 1 ครั้งละ 0.010000 ต่อมิลลิเมตร และใช้สมการ (3.7 ก.) และสมการ (3.7 ข.) คำนวณหารูปร่างของเลนส์ได้หลายรูปร่าง ดังแสดงในตารางที่ 3.3 ซึ่งเป็นตารางแสดงค่าความโค้งของผิวเลนส์อรงค์ที่มีทางยาวโฟกัส

ตารางที่ 3.3 ชุดค่าความโค้งของผิวของเลนส์หน้าและเลนส์ใกล้ตา ของกล้องจุลทัศน์มีหน่วยเป็นต่อมิลลิเมตร

| $c_1$ (ต่อมิลลิเมตร) | $c_2$ (ต่อมิลลิเมตร) | $c_3$ (ต่อมิลลิเมตร) |
|---|---|---|
| 0 | +0.073713 | −0.073228 |
| +0.010000 | +0.083713 | −0.063228 |
| +0.020000 | +0.093713 | −0.053228 |
| +0.030000 | +0.103713 | −0.043228 |
| +0.040000 | +0.113713 | −0.033228 |
| +0.050000 | +0.123713 | −0.023228 |
| +0.060000 | +0.133713 | −0.013228 |
| +0.070000 | +0.143713 | −0.003228 |
| +0.080000 | +0.153713 | +0.006772 |
| +0.090000 | +0.163713 | +0.016772 |
| +0.100000 | +0.173713 | +0.026772 |

เป็น 25 มิลลิเมตร ประกอบด้วยเลนส์เว้าที่ทำจากแก้วฟลินท์ชนิดแน่น ซึ่งมีค่าดัชนีหักเหสำหรับแสงเหลือง ( $n_D$ ) เป็น 1.69865 และค่าวีเป็น 32.02 และเลนส์นูนที่ทำจากแก้วแบเรียมคราวน์ชนิดแน่น ซึ่งมีค่าดัชนีหักเหสำหรับแสงเหลือง( $n_D$ ) เป็น 1.62270 และค่าวีเป็น 56.89 สำหรับการคำนวณและเลือกรูปร่างของเลนส์อรงค์ เพื่อแก้ให้โคมาเป็นศูนย์และให้เหลือความกลาดทรงกลมน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ จะได้กล่าวในหัวข้อต่อไป

สรุปได้ว่า เลนส์รองค์สำหรับเลนส์หน้าและเลนส์ใกล้ตาของกล้องจุลทัศน์เชิงซ้อนนี้ประกอบด้วยเลนส์ที่ทำจากแก้วฟลินท์ชนิดแน่น ซึ่งเป็นเลนส์เว้ามีกำลังของเลนส์เป็น −0.051500 ต่อมิลลิเมตร และเลนส์ที่ทำจากแก้วแบเรียมคราวน์ชนิดแน่น ซึ่งเป็นเลนส์นูนมีกำลังของเลนส์เป็น + 0.091500 ต่อมิลลิเมตร

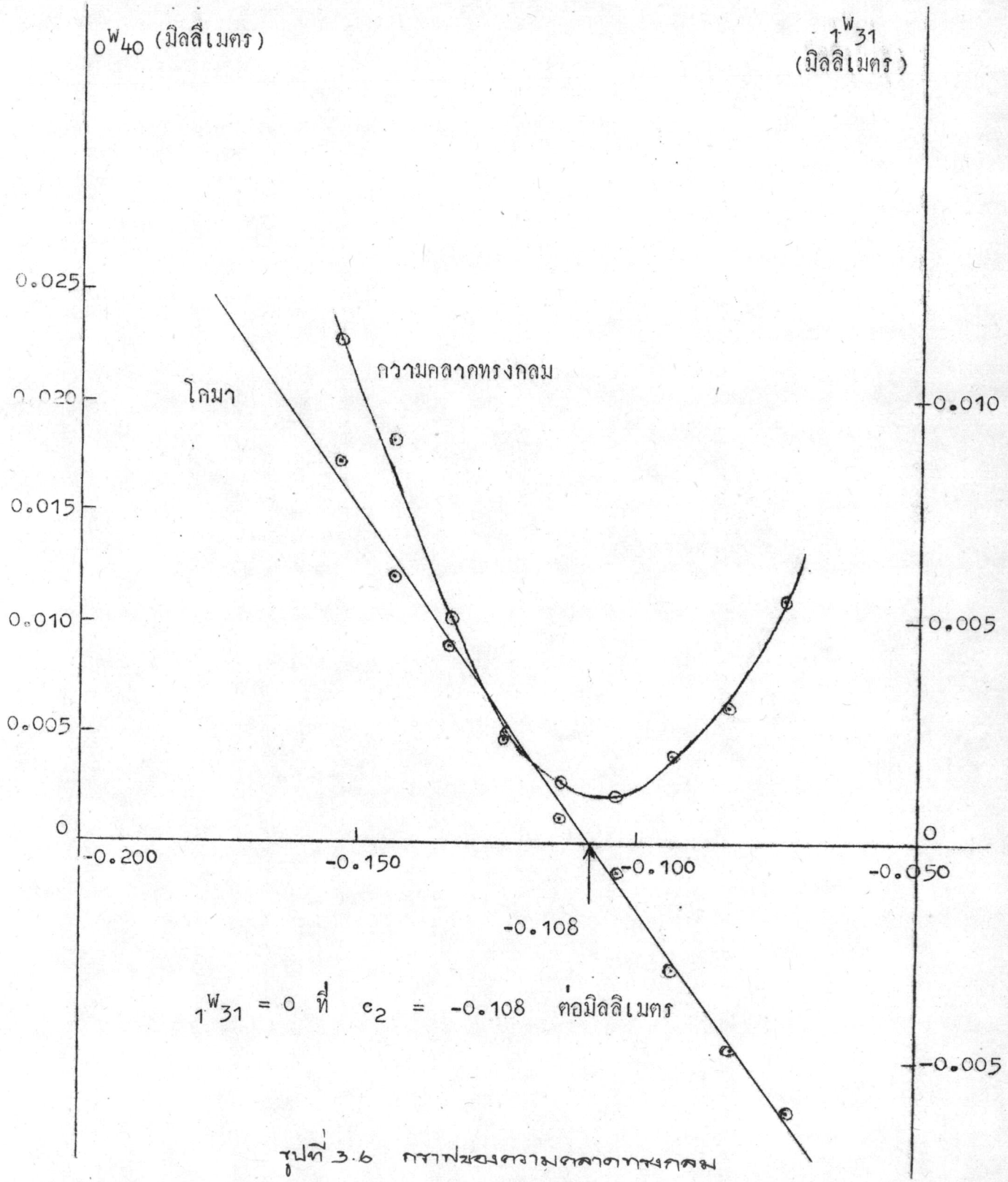
2.2 <u>การคำนวณและเลือกรูปร่างของเลนส์หน้าเพื่อลดความคลาดเอกรงค์</u>

เช่นเดียวกับเลนส์รองค์สำหรับคอลลิเมเตอร์ ความคลาดเอกรงค์ที่คำนึงถึงในการออกแบบเลนส์รองค์สำหรับเลนส์หน้า คือความคลาดทรงกลม และโคมา การออกแบบเลนส์หน้านี้จะลดให้โคมาเป็นศูนย์ และลดความคลาดทรงกลมให้เหลือน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้

เมื่อทราบค่าความโค้งของผิวเลนส์รองค์ คือ $c_1$ $c_2$ และ $c_3$ และให้ระยะระหว่างขั้วของผิวที่ 1 กับผิวที่ 2 ($t_{12}$) เป็น 3 มิลลิเมตร ระยะระหว่างขั้วของผิวที่ 2 กับผิวที่ 3 ($t_{23}$) เป็น 3 มิลลิเมตร นำค่าเหล่านี้มาใช้คำนวณหาจุดโฟกัสทุติยภูมิของเลนส์ โดยให้แสงขนานตกที่ผิวแรก ($c_1$) แล้วหาภาพจากการหักเหของแสงที่แต่ละผิว ตำแหน่งที่แสงหักเหออกจากผิวสุดท้ายตัดกัน คือ ตำแหน่งจุดโฟกัสทุติยภูมิของเลนส์ กล้องจุลทัศน์มีความยาวกล้องทางทัศนศาสตร์เป็น 50 มิลลิเมตร ดังนั้น ภาพของวัตถุที่อยู่หน้าเลนส์หน้าของกล้อง จะอยู่หลังจุดโฟกัสทุติยภูมิของเลนส์หน้า 50 มิลลิเมตร ณ จุดภาพนี้มีตัวจำกัดลำแสงแบบสนาม ซึ่งมีขนาด 7.5 มิลลิเมตร วางอยู่ และกำหนดให้เลนส์หน้ามีขนาด 10 มิลลิเมตร จากข้อมูลต่าง ๆ เหล่านี้ จะคำนวณหาสัมประสิทธิ์ความคลาดทรงกลมและโคมาโดยการแกะรอยรังสีใกล้แกน และรังสีมุขสำคัญใกล้แกน จากตัวจำกัดลำแสงแบบสนามไปยังด้านหน้าของเลนส์หน้า เพื่อความสะดวกในการคำนวณจะกลับผิวเลนส์ ดังนั้น ในที่นี้ผิวที่ 1 ($c_1$) จะเป็นผิว 3 ($c_3$) ของเลนส์ที่ได้ออกแบบไว้ ผลที่ได้แสดงในตารางที่ 3.4 และเมื่อนำค่าความโค้งของผิวกลาง ($c_2$) มาเขียนกราฟกับสัมประสิทธิ์ของความคลาดทรงกลม และสัมประสิทธิ์ของโคมา จะได้กราฟดังรูปที่ 3.6

ตารางที่ 3.4 สัมประสิทธิ์ของความคลาดทรงกลมและสัมประสิทธิ์ของโคมาของเลนส์หน้า

| $c_1$ (ต่อมิลลิเมตร) | $c_2$ (ต่อมิลลิเมตร) | $c_3$ (ต่อมิลลิเมตร) | $_0W_{40}$ (มิลลิเมตร) | $_1W_{31}$ (มิลลิเมตร) |
|---|---|---|---|---|
| +0.073228 | -0.073713 | 0 | +0.011423 | -0.006544 |
| +0.063228 | -0.083713 | -0.010000 | +0.006831 | -0.004739 |
| +0.053228 | -0.093713 | -0.020000 | +0.004121 | -0.002920 |
| +0.043228 | -0.103713 | -0.030000 | +0.002043 | -0.000726 |
| +0.033228 | -0.113713 | -0.040000 | +0.002929 | +0.000582 |
| +0.023228 | -0.123713 | -0.050000 | +0.005295 | +0.002326 |
| +0.013228 | -0.133713 | -0.060000 | +0.010277 | +0.004068 |
| +0.003228 | -0.143713 | -0.070000 | +0.018596 | +0.005783 |
| -0.006772 | -0.153713 | -0.080000 | +0.022950 | +0.006069 |
| -9.016772 | -0.163713 | -0.090000 | +0.049353 | +0.008928 |
| -0.026772 | -0.173713 | -0.100000 | +0.074624 | +0.010168 |

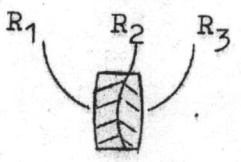



รูปที่ 3.6 กราฟของความคลาดทรงกลม

และโคมาของเลนส์ทำ

จากกราฟตรงจุดที่สัมประสิทธิ์ของโคมาของเลนส์หน้าของกล้องจุลทัศน์เป็นศูนย์อยู่ที่จุดซึ่งความโค้งของผิวที่ 2 ( $c_2$ ) ของเลนส์เป็น -0.1080 ต่อมิลลิเมตร ดังนั้น ความโค้งของผิวที่ 2 ( $C_2$ ) ของเลนส์หน้าที่นำมาใช้งานเป็น +0.1080 ต่อมิลลิเมตร โดยใช้สมการ (3.7 ก.) และสมการ (3.7 ข.) สามารถคำนวณหาความโค้งของผิวที่ 1 ( $C_1$ ) และผิวที่ 3 ( $C_3$ ) ได้เป็น +0.034287 ต่อมิลลิเมตร และ -0.038941 ต่อมิลลิเมตร ตามลำดับ นั่นคือ เลนส์หน้าของกล้องจุลทัศน์ตามลักษณะที่ใช้งานมีรูปร่างดังนี้ รัศมีความโค้งของผิวที่ 1 ( $R_1$ ) เป็น +29.2 มิลลิเมตร รัศมีความโค้งของผิวที่ 2 ( $R_2$ ) เป็น +9.26 มิลลิเมตร และรัศมีความโค้งของผิวที่ 3 ( $R_3$ ) เป็น = -25.7 มิลลิเมตร

สรุปได้ว่า เลนส์หน้าของกล้องจุลทัศน์ที่ออกแบบไว้ ประกอบด้วยเลนส์เว้าซึ่งทำจากแก้วฟลินท์ชนิดแน่นมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเป็น 10 มิลลิเมตร รัศมีความโค้งของผิวที่ 1 และผิวที่ 2 เป็น +29.2 มิลลิเมตร และ +9.26 มิลลิเมตร ตามลำดับ ระยะระหว่างขั้วของผิวโค้งทั้งสองเป็น 3 มิลลิเมตร และเลนส์นูนซึ่งทำจากแก้วแบเรียมคราวน์ชนิดแน่น มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร รัศมีความโค้งของผิวที่ 1 และผิวที่ 2 เป็น +9.26 มิลลิเมตร และ -25.7 มิลลิเมตร ตามลำดับ ระยะระหว่างขั้วของผิวทั้งสองเป็น 3 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.7 เลนส์ที่ออกแบบนี้จะมีความคลาดรงค์เป็นศูนย์ โคมาเป็นศูนย์ และมีความคลาดทรงกลมเหลืออยู่โดยมีสัมประสิทธิ์ของความคลาดเป็น +0.0025 มิลลิเมตร




รูปที่ 3.7 เลนส์หน้าของกล้องจุลทัศน์ที่ออกแบบ
(โดยมี $R_1$ = +29.2 มิลลิเมตร
$R_2$ = +9.26 มิลลิเมตร
$R_3$ = -25.7 มิลลิเมตร)

ในการคำนวณหาระยะใช้งานที่แท้จริงของกล้องจุลทัศน์นี้ จะทำได้โดย ทราบว่าเลนส์หน้าที่ออกแบบไว้มี $R_1 = +29.2$ มิลลิเมตร

$R_2 = +9.26$ มิลลิเมตร

และ $R_3 = -25.7$ มิลลิเมตร

จากสมการเกาส์เซียน คือ

$$\frac{n'}{r'} - \frac{n}{1} = \frac{n' - n}{R}$$

เมื่อให้แสงตกขนานตกที่ผิวหน้าของเลนส์หน้า จะได้ภาพสุดท้ายห่างจากผิวสุดท้ายไปทางขวาเป็นระยะทาง 24.069197 มิลลิเมตร จุดนี้คือจุดโฟกัสทุติยภูมิของเลนส์หน้า นั่นก็คือ ภาพของวัตถุที่อยู่หน้าเลนส์เนื่องจากเลนส์หน้าจะอยู่หลังผิวสุดท้ายไปทางขวาเป็นระยะทาง

$$= +24.069197 + 50 \text{ มิลลิเมตร}$$

$$= +74.069197 \text{ มิลลิเมตร}$$

จากนี้คำนวณย้อนหาตำแหน่งวัตถุของเลนส์หน้านี้ โดยใช้สมการเกาส์เซียน จะได้ว่า วัตถุอยู่ห่างจากผิวแรกของเลนส์หน้า -37.476223 มิลลิเมตร นั่นก็คือ เมื่อมองวัตถุผ่านกล้องจุลทัศน์นี้ จะเห็นภาพได้ชัดเจนต่อเมื่อวัตถุนั้นอยู่ห่างจากผิวแรกของเลนส์หน้าเป็นระยะ 37.48 มิลลิเมตร ระยะนี้เรียกว่า ระยะใช้งานของกล้องจุลทัศน์

2.3 <u>การคำนวณและเลือกรูปร่างของเลนส์ใกล้ตาเพื่อลดความคลาดเอกรงค์</u>
ทำเช่นเดียวกับหัวข้อ 2.2 นั่นคือ เมื่อทราบค่าความโค้งของผิวเลนส์อรงค์ คือ $c_1$ $c_2$ และ $c_3$ นำค่าเหล่านี้มาใช้ในการคำนวณจุดโฟกัสปฐมภูมิของเลนส์ใกล้ตา ซึ่งจุดนี้จะเป็นจุดวัตถุของเลนส์ใกล้ตาของกล้องจุลทัศน์ ส่วนการคำนวณหาสัมประสิทธิ์ของความคลาดทรงกลมและสัมประสิทธิ์ของโคมา จะทำได้โดยให้แสงขนานตกจากด้านหลังของเลนส์ใกล้ตา สำหรับวิธีการคำนวณ ได้ใช้วิธีกลับเลนส์เช่นเดียวกับหัวข้อ 2.2 นั่นก็คือ เลนส์ใกล้ตาที่ได้ออกแบบไว้มี

$c_1$ = 0 ต่อมิลลิเมตร

$c_2$ = +0.073713 ต่อมิลลิเมตร

$c_3$ = -0.073228 ต่อมิลลิเมตร

ในการคำนวณนี้ได้ใช้

$c_1$ = +0.073228 ต่อมิลลิเมตร

$c_2$ = -0.073713 ต่อมิลลิเมตร

$c_3$ = 0 ต่อมิลลิเมตร

ระยะระหว่างขั้วของผิวที่ 1 กับผิวที่ 2 ( $t_{12}$ ) = 3 มิลลิเมตร

ระยะระหว่างขั้วของผิวที่ 2 กับผิวที่ 3 ( $t_{23}$ ) = 3 มิลลิเมตร

และขนาดของเลนส์ใกล้ตา = 10 มิลลิเมตร

โดยการใช้การแกะรอยรังสีใกล้แกนของเลนส์ใกล้ตาที่มีรูปร่างดังกล่าว จะได้สัมประสิทธิ์ของความกลาดทรงกลมเป็น

$$_0W_{40} = +0.004447 \quad \text{มิลลิเมตร}$$

จากที่ทราบว่าตัวจำกัดลำแสงแบบสนามมีขนาด 7.5 มิลลิเมตร และระยะระหว่างตัวจำกัดลำแสงแบบสนามกับผิวแรก ( $c_1$ ) เป็น 26.858917 มิลลิเมตร ดังนั้น มุมชันของรังสีมุขยสำคัญใกล้แกนที่ตกผิวแรกจะหาได้จาก

$$\bar{u}_1 = -\frac{7.5}{2 \times 26.858917} \quad \text{เรเดียน}$$

$$= -0.139618 \quad \text{เรเดียน}$$

โดยใช้วิธีการคำนวณแกะรอยรังสีมุขยสำคัญใกล้แกนเช่นเดียวกับตัวอย่างในหัวข้อที่ 1.2 ของบทนี้ สามารถคำนวณหาสัมประสิทธิ์ของโคมาของเลนส์ใกล้ตา ได้ว่า

$$_1W_{31} = +0.006276 \quad \text{มิลลิเมตร}$$

ดังนั้น เมื่อกลับเลนส์ใกล้ตาของกล้องจุลทัศน์ให้อยู่ในลักษณะที่ใช้งาน เลนส์จะมีความโค้งของผิวเป็นดังนี้

$c_1$ = 0 ต่อมิลลิเมตร

$c_2$ = +0.073713 ต่อมิลลิเมตร

$c_3$ = -0.073228 ต่อมิลลิเมตร

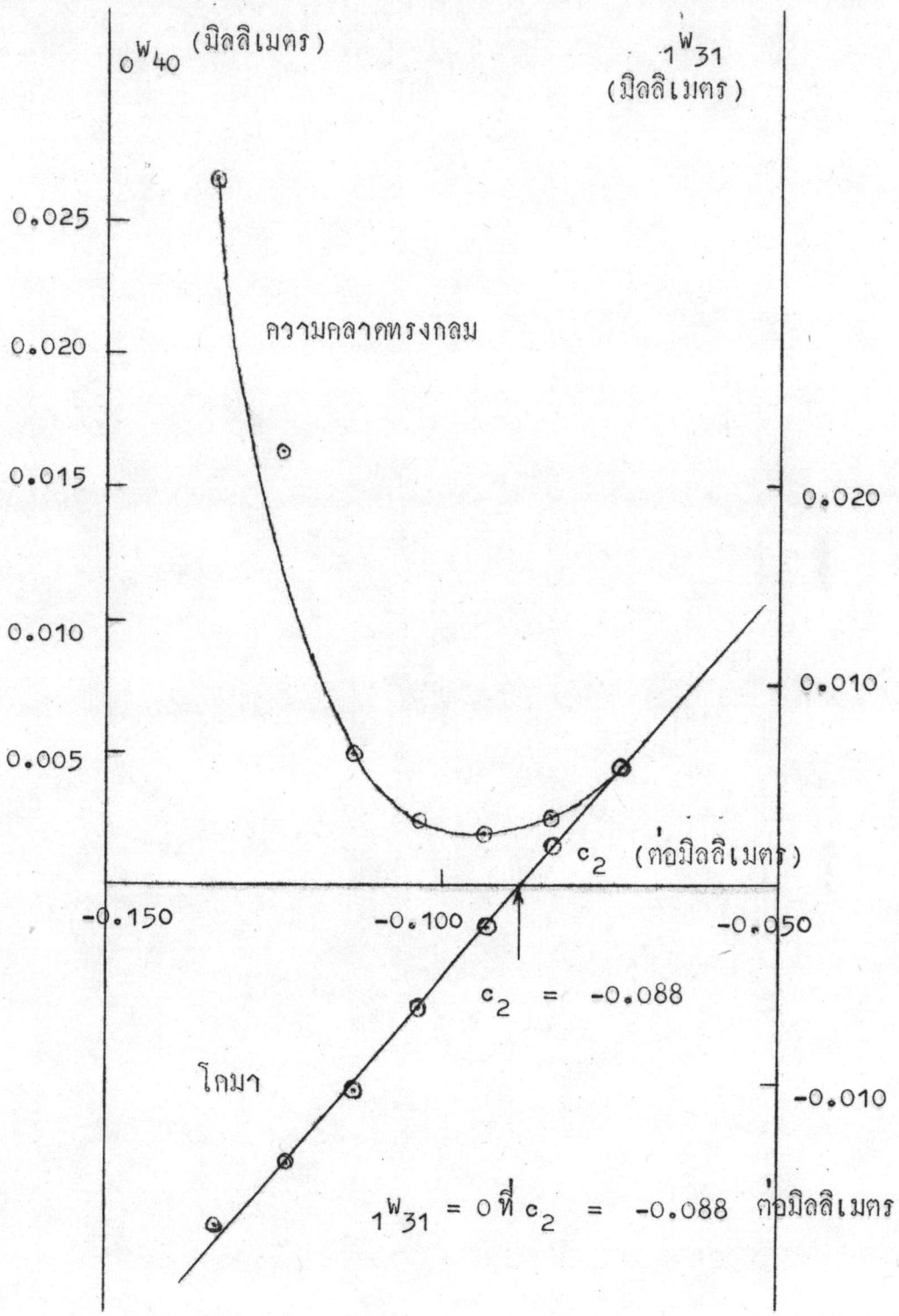
โดยมีค่าสัมประสิทธิ์ของความคลาดทรงกลม = +0.004447 มิลลิเมตร

และค่าสัมประสิทธิ์ของโคมา = +0.006276 มิลลิเมตร

การคำนวณเลือกรูปร่างของเลนส์ใกล้ตา ทำได้โดยคำนวณหาสัมประสิทธิ์ของความคลาดทรงกลมและสัมประสิทธิ์ของโคมาของเลนส์ใกล้ตาที่มีรูปร่างต่าง ๆ ตามตารางที่ 3.3 ได้ดังวิธีที่กล่าวมาข้างต้น ค่าทั้งหมดแสดงไว้ในตารางที่ 3.5 นำค่าความโค้งของผิวที่ 2 ของเลนส์ใกล้ตากับสัมประสิทธิ์ของความคลาดทรงกลมและสัมประสิทธิ์ของโคมามาเขียนกราฟ กราฟระหว่างความโค้งของผิวเลนส์กับสัมประสิทธิ์ของความคลาดทรงกลมมีลักษณะเป็นพาราโบลา และกราฟระหว่างความโค้งของผิวเลนส์กับสัมประสิทธิ์ของโคมามีลักษณะเป็นเส้นตรง ดังแสดงในรูปที่ 3.8

ตารางที่ 3.5 สัมประสิทธิ์ของความคลาดทรงกลมกับสัมประสิทธิ์ของโคมาของเลนส์ใกล้ตา

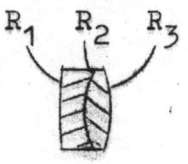
| $c_1$ (ต่อมิลลิเมตร) | $c_2$ (ต่อมิลลิเมตร) | $c_3$ (ต่อมิลลิเมตร) | $_0W_{40}$ (มิลลิเมตร) | $_1W_{31}$ (มิลลิเมตร) |
|---|---|---|---|---|
| +0.073228 | -0.073713 | 0 | +0.004447 | +0.006276 |
| +0.063228 | -0.083713 | -0.010000 | +0.002443 | +0.001910 |
| +0.053228 | -0.093713 | -0.020000 | +0.001717 | -0.002311 |
| +0.043228 | -0.103713 | -0.030000 | +0.002428 | -0.006393 |
| +0.033228 | -0.113713 | -0.040000 | +0.004825 | -0.010325 |
| +0.023228 | -0.123713 | -0.050000 | +0.009273 | -0.014074 |
| +0.013228 | -0.133713 | -0.060000 | +0.016280 | -0.017579 |
| +0.003228 | -0.143713 | -0.070000 | +0.026524 | -0.020741 |
| -0.006772 | -0.153713 | -0.080000 | +0.040892 | -0.023417 |
| -0.016772 | -0.163713 | -0.090000 | +0.060520 | -0.025412 |
| -0.026772 | -0.173713 | -0.100000 | +0.086830 | -0.026464 |




รูปที่ 3.8 กราฟของความคลาดทรงกลมและโคมาของเลนส์ใกล้ตา

สำหรับเลนส์ใกล้ตาของกล้องจุลทัศน์นี้ จากกราฟจะเลือกให้สัมประสิทธิ์ของโคมาเป็นศูนย์ และได้ความโค้งของผิวที่ 2 ( $c_2$ ) ของเลนส์ใกล้ตาเป็น -0.088 ต่อมิลลิเมตร ดังนั้น ความโค้งของผิวที่ 2 ( $c_2$ ) ของเลนส์ใกล้ตาที่นำมาใช้งานเป็น +0.088 ต่อมิลลิเมตร โดยใช้สมการ (3.7 ก.) และสมการ (3.7 ข.) คำนวณหาความโค้งของผิวที่ 1 ( $c_1$ ) และผิวที่ 3 ( $c_3$ ) ได้เป็น +0.014287 ต่อมิลลิเมตร และ -0.058941 ต่อมิลลิเมตร ตามลำดับ ดังนั้น เลนส์ใกล้ตาของกล้องจุลทัศน์มีรูปร่างดังนี้ รัศมีความโค้งของผิวที่ 1 ( $R_1$ ) เป็น +70.0 มิลลิเมตร รัศมีความโค้งของผิวที่ 2 ( $R_2$ ) เป็น +11.4 มิลลิเมตร และรัศมีความโค้งของผิวที่ 3 ( $R_3$ ) เป็น -16.9 มิลลิเมตร

สรุปได้ว่า เลนส์ใกล้ตาของกล้องจุลทัศน์ที่ออกแบบไว้ประกอบด้วยเลนส์เว้า ซึ่งทำจากแก้วฟลินท์ชนิดแน่น มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเลนส์เป็น 10 มิลลิเมตร รัศมีความโค้งของผิวที่ 1 และผิวที่ 2 เป็น +70.0 มิลลิเมตร และ +11.4 มิลลิเมตร ตามลำดับ ระยะระหว่างขั้วของผิวโค้งทั้งสองเป็น 3 มิลลิเมตร และเลนส์นูนซึ่งทำจากแก้วแบเรียมคราวน์ชนิดแน่นมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร รัศมีความโค้งของผิวที่ 1 และผิวที่ 2 เป็น +11.4 มิลลิเมตร และ -16.9 มิลลิเมตร ตามลำดับ ระยะระหว่างขั้วของผิวทั้งสองเป็น 3 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.9 เลนส์ที่ออกแบบนี้ จะมีความคลาดกรงค์เป็นศูนย์ โคมาเป็นศูนย์ และมีความคลาดทรงกลมเหลืออยู่โดยมีสัมประสิทธิ์ของความคลาดเป็น 0.0022 มิลลิเมตร




รูปที่ 3.9 เลนส์ใกล้ตาของกล้องจุลทัศน์ที่ออกแบบ
(โดยมี $R_1$ = +70.0 มิลลิเมตร
$R_2$ = +11.4 มิลลิเมตร
$R_3$ = -16.9 มิลลิเมตร)

3. <u>การสร้างเลนส์รงก์</u> (4,11)

เนื่องจากแก้วทางทัศนศาสตร์ที่จะนำมาใช้ในการสร้างเลนส์มีความหนามากเกินความต้องการ ดังนั้นจึงต้องตัดแก้วให้เป็นแผ่นบางโดยให้มีความหนาเหมาะกับความหนาระหว่างขั้วของผิวเลนส์ โดยใช้เครื่องตัดแก้วที่มีอยู่ในห้องปฏิบัติการทำเลนส์ ภาควิชาฟิสิกส์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ขณะที่ตัดแผ่นแก้วให้บางนั้นจำเป็นต้องใช้คูลแลนท์ ( coolant) ซึ่งเป็นสารละลายหล่อไว้ที่ใบมีดของเครื่องตัดแก้วตลอดเวลาเพื่อระบายความร้อน ซึ่งจะทำให้แก้วแตกร้าวได้ เมื่อได้แก้วเป็นแผ่นบางแล้วขั้นต่อไปนำมาตัดให้เป็นแผ่นกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางตามต้องการโดยใช้หัวตัดที่สร้างขึ้น ซึ่งจะนำไปติดกับเครื่องเจาะโลหะ หัวตัดนี้มีลักษณะเป็นโลหะรูปทรงกระบอก ปลายข้างหนึ่งทำให้เป็นแกนสำหรับสอดเข้ากับเครื่องเจาะโลหะ ปลายอีกข้างหนึ่งทำเป็นลักษณะคล้ายฟันเลื่อย ในขณะที่ตัดแก้วให้เป็นแผ่นกลมต้องโรยผงขัดคาร์บอรันดัม ( carborundum ) ชนิดหยาบที่สุดที่มีอยู่ในห้องปฏิบัติการทำเลนส์ พร้อมทั้งหยอดน้ำด้วย ผงขัดนี้จะค่อย ๆ ถูกหัวตัดกดลงไปให้เสียดสีกับเนื้อแก้วทำให้เนื้อแก้วส่วนนั้นหลุดออกมา ในที่สุดจะได้แผ่นกลมซึ่งมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางตามต้องการ

ต่อไปนำแผ่นแก้วกลมที่ได้มาฝน ( grinding ) ให้มีผิวโค้งตามต้องการโดยใช้เครื่องฝนผิวโค้ง ( grinding machine ) ที่มีอยู่ในห้องปฏิบัติการทำเลนส์ ผิวโค้งของแก้วที่ได้จากการฝนนี้ค่อนข้างหยาบ จากนั้นนำแก้วที่ฝนผิวโค้งแล้วมาขัดให้มีผิวเรียบขึ้นโดยใช้เครื่องขัดเรียบและขัดใส การขัดเรียบต้องใช้ผงขัดคาร์บอรันดัมที่มีขนาดค่อนข้างหยาบไปจนถึงละเอียดสุด พร้อมหยอดน้ำขณะทำการขัดเรียบด้วย เครื่องขัดเรียบและขัดใสมีส่วนประกอบหลัก 2 ส่วน คือ แกนหมุนที่วางตัวในแนวดิ่ง และแขนที่สามารถเคลื่อนที่กลับไปมาในแนวราบ ปลายของแต่ละส่วนจะมีทูล ( tool ) ที่มีรัศมีความโค้งตามต้องการติดอยู่ ในการขัดเรียบและขัดใสนั้นผิวแก้วที่ไม่ถูกขัดจะติดแน่นอยู่บนทูลซึ่งสวมอยู่บนแกนหมุน ส่วนทูลที่ติดกับแขนถูกวางไว้บนผิวโค้งที่จะขัดให้เรียบ ทูลอันข้างบนต้องมีรัศมีความโค้งเดียวกับผิวโค้งที่จะขัดเรียบเพียงแต่มีเครื่องหมายต่างกันเท่านั้น

หมายความว่า ถ้าขัดเรียบผิวนูนต้องใช้ทูลผิวเว้า หรือขัดเรียบผิวเว้าต้องใช้ทูลผิวนูน เมื่อเครื่องขัดเรียบและขัดใสทำงาน แก้วจะหมุนตามแกน ส่วนทูลอันบนที่ติดกับแขนจะเคลื่อนที่กลับไปมาในแนวราบ แต่เนื่องจากแขนที่เคลื่อนที่กลับไปมาในแนวราบของเครื่องขัดเรียบและขัดใสในห้องปฏิบัติการทำเลนส์ไม่สามารถใช้งานได้ จึงจำเป็นต้องขัดเรียบด้วยตนเอง โดยใช้มือแทนแขนของเครื่อง โดยให้ทูลอันบนที่ใช้ขัดผิวให้เรียบกลับมาสวมอยู่บนแกนหมุน และแก้วอันนั้นจะถูกทำให้เคลื่อนที่ไปมาในแนวราบด้วยมือของผู้ฝน ผงขัดคาร์บอรันดัมที่ใช้ได้แก่หมายเลข 4 หมายเลข 5 และหมายเลข 6 ที่มีอยู่ในห้องปฏิบัติการทำเลนส์ ครั้งแรกของการขัดเรียบจะใช้ผงขัดหมายเลข 4 ซึ่งหยาบที่สุดเพื่อที่จะลดขนาดของหลุมบนผิวโค้งซึ่งเกิดจากการฝน การขัดเรียบถ้าจะใช้ผงขัดหมายเลขต่อไป ต้องดูขนาดของหลุมบนผิวโค้งด้วยแว่นขยาย ถ้าขนาดของหลุมใกล้เคียงกันจึงเปลี่ยนผงขัดหมายเลขต่อไปได้ ก่อนที่จะเปลี่ยนขนาดของผงขัดต้องล้างผิวโค้งและทูลให้สะอาดจนแน่ใจว่าไม่มีผงขัดหมายเลขเดิมเหลืออยู่ เมื่อเสร็จจากการใช้ผงขัดหมายเลข 4 แล้ว จึงใช้ผงขัดหมายเลข 5 และหมายเลข 6 ต่อไปตามลำดับ ซึ่งจะลดขนาดของหลุมบนผิวโค้งให้เล็กลง ๆ ในที่สุด ผิวโค้งที่ขัดเรียบด้วยผงขัดหมายเลข 6 และไม่มีรอยขีดข่วน จะมีลักษณะของผิวค่อนข้างนวลและมองเกือบทะลุเนื้อแก้วได้ เมื่อผ่านขั้นตอนของการขัดเรียบผิวโค้งแล้วจะนำมาขัดใสต่อ โดยหลอมพิทช์ ( pitch ) ซึ่งเป็นยางมะตอยบริสุทธิ์แล้วเทลงบนทูล ทิ้งให้เย็น พิทช์จะแข็งตัวและติดอยู่กับทูล จากนั้นทำให้พิทช์อ่อนตัวเล็กน้อยโดยจุ่มผิวบนของพิทช์ลงในน้ำร้อน และใช้ผิวโค้งที่ได้ขัดเรียบแล้วมากดทาบกับพิทช์เพื่อให้พิทช์มีความโค้งเท่ากับผิวโค้งของแก้วที่จะขัดใสโดยตลอด นำพิทช์มาแซะให้เป็นร่องตัดกันเป็นตารางเพื่อให้น้ำและผงขัดใสขังอยู่ในร่องได้ขณะขัดใส การขัดใสใช้ผงขัดหมายเลข 7 เรียกว่ารูจ (rouge) ซึ่งเป็นออกไซด์ของเหล็ก ( $Fe_3O_4$ ) ผิวโค้งที่ผ่านการขัดใสแล้วจะมองผ่านทะลุเนื้อแก้วได้ โดยใช้วิธีการที่ได้อธิบายมาแล้วกระทำกับผิวทั้งสองของแก้วแผ่นกลมจะได้เลนส์ตามต้องการ

เมื่อได้เลนส์นูนและเลนส์เว้าตามต้องการแล้ว ก่อนที่จะประกบเลนส์ทั้งสอง ต้องนำเลนส์ทั้งสองมาแต่งขอบเลนส์ ( edging ) และวัดรัศมีความโค้งของผิวเลนส์ก่อน การวัดรัศมีความโค้งของผิวเลนส์ จะกล่าวอย่างละเอียดในบทที่ 4 ต่อไป การประกบเลนส์ใช้ซีเมนต์ ( cement ) หยอดลงบนผิวของเลนส์เว้าที่จะประกบ แล้ววางผิวของเลนส์นูนที่จะประกบลงบนเลนส์เว้าพร้อมกับค่อย ๆ หมุน และคลึงเลนส์นูนเพื่อไล่ฟองอากาศที่มีอยู่ในซีเมนต์ออกให้หมด และทิ้งไว้ให้ซีเมนต์แข็งตัว ก็จะได้เลนส์คู่ประกบที่ใช้งานได้