

Compensatory Mechanism of Sagittal Imbalance

Chong-Suh Lee, M.D.

Department of Orthopaedic Surgery, Samsung Medical Center, Sungkyunkwan University School of Medicine, Seoul, Korea

To understand the compensatory mechanisms of knee and hip joint for sagittal imbalance, it is very important to investigate the response of each joint to the abnormal condition of other joint. Most of studies so far were limited to the response of spine and hip joint to the sagittal imbalance and it is very rare to include the response of knee joint. We assume four conditions and investigate the response of each joint to the abnormal condition of other joint

1. The normal response of spine and pelvis to the knee flexion contracture
2. The response of spine and pelvis to the correction of knee flexion contracture
3. The response of knee and hip joint to the loss of lumbar lordosis
4. The response of knee and hip joint to the restoration of knee and hip joint

The results show that the flexion contracture of knee joint makes hip joint flexed and loss of lumbar lordosis with shift the sagittal balance forward. When flexion contracture was corrected like TKRA, hip joint also extended and lumbar lordosis increase and sagittal balance moves backward. Loss of lumbar lordosis makes more positive sagittal balance and hip joint becomes extended and knee joint flexed. The restoration of lumbar lordosis, sagittal balance shift backward and knee joint extended. However, if restoration of lumbar lordosis is not complete, hip joint remains extended, while knee joint becomes normal position, the extended position.

Key Words: Knee joint, Hip joint, Sagittal imbalance, Compensatory mechanism

서론

기립자세를 취하게 되는 가장 중요한 두가지 기전은 고관절의 신전과 요추 전만을 만드는 것이다. 이러한 기립자세를 취하는 두가지 기전은 시상면상 불균형을 보상하는 가장 중요한 두가지 기전으로도 작용한다. 즉, 고관절의 신전이 잘 되지 않는 고관절 굴곡구축의 경우는 과도한 요추 전만을 만들므로써 보상하게 되고 요추전만이 잘 만들어지지 않는 요추부의 퇴행성변화에 의한 후만증의 경우에는 과도하게 고관절을 신전시키므로써 보상하게 된다. 고관절의 신전은 고관절을 축으로 골반이 후방 회전하므로써 발생되게 되며 고관절을 축으로 한 골반의 이와 같은 보상기전을 “pelvic compensation”이라고 부른다. 이러한 시상면상 균형을 위한 보상작용은 위의 두가지 중요한 기전 이외에도 분절각이 감소된 위,아래분절에서 과전만각이 형성되는 “segmental compensation”, 요추 전만이 감소시 인접구역인 흉추의 전만이 증가하는

“regional compensation”, 고관절과 슬관절에서 일어나는 “global compensation”등 여러 형태의 보상기전이 작용하게 된다.

실제로 요추와 슬관절의 퇴행성변화가 함께 발생하는 경우가 매우 흔하며 이 두가지 구조물은 서로의 시상면상 정렬에 영향을 주고 있다. 따라서, 이러한 global compensation의 가전을 이해하기 위하여는 슬관절과 고관절에서 어떠한 작용이 일어나는지를 이해하는 것이 매우 중요하다. 그러나 이제까지의 대부분의 연구는 척추내와 고관절까지의 변화에 국한되었고 슬관절을 포함한 하지의 역할에 대한 연구는 매우 미미하다. 슬관절과 고관

Corresponding author: Chong-Suh Lee, M.D.

Department of Orthopaedic Surgery, Samsung Medical Center, Sungkyunkwan University School of Medicine, 50 Irwon-dong, Gangnam-gu, Seoul 135-710, Korea

TEL: 82-2-3410-3509, **FAX:** 82-2-3410-0061

E-mail: csl3503@skku.edu

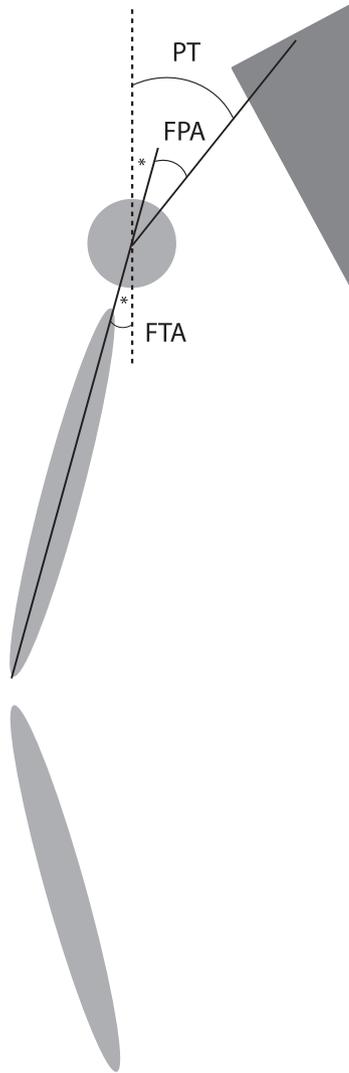


Fig. 1. FTA: angle between vertical axis and sagittal femoral axis to represent inclination of femur and knee flexion. FPA: angle between sagittal femoral axis and a line joining the middle of S1 cranial endplate to the center of bicoxofemoral axis. $PT = FTA + FPA$

절에서의 보상기전을 이해하기 위하여 다음과 같은 4가지 상황에 대한 연구를 시행하였다.

1. 슬관절의 굴곡구축에 대한 척추와 골반의 정상적인 반응
2. 슬관절의 굴곡구축을 교정하였을 경우 척추와 골반의 반응
3. 요추전만의 소실시 슬관절과 고관절의 반응
4. 요추전만을 회복하였을 때 슬관절과 고관절의 반응

슬관절의 굴곡구축에 대한 척추와 골반의 정상적인 반응

슬관절의 굴곡구축과 같은 상황을 만들기 위하여 motion controlled knee brace를 착용시켜 착용전, 15도 굴곡, 30도굴곡의 상황시 고관절과 척추의 반응을 조사하기 위하여 4가지의 척추지표: 요추전만각(LL), 흉추 후만각(TK), 제 1시상균형(B1: C7 plumb line to posterior superior corner of S1), 제 2시상균형(B2: C7 plumb line to bicoxofemoral axis)와 5가지의 골반 및 하지의 지표: sacral slope(SS), pelvic tilt(PT), pelvic incidence(PI), femoral tilt angle(FTA), femoropelvic angle(FPA)을 측정하였다. 여기에서 $PI = SS + PT$, $PT = FTA + FPA$ 이라는 관계가 설정된다(Fig. 1)(Table 1).

본 연구에서는 슬관절이 굴곡될수록 고관절도 굴곡되고 요추전만이 감소되며 시상균형도 전방으로 이동됨을 알 수 있으며 PT, SS이나 흉추후만에는 거의 변화가 없음을 알 수 있다. 슬관절이 굴곡되면서 일어날 수 있는 상황은 슬관절이 굴곡되면서 PT가 증가되는 상황이 있을 수 있으며 또한 PT의 변화가 없는 상황이 있을 수 있다. 정상적인 경우에는 후자의 반응이 일어난다. 그러나 요추전

Table 1. Changes of spinopelvic alignment and sagittal balance in response to simulated knee flexion contracture

Knee setting		FTA(°)	FPA(°)	PT(°)	SS(°)	PI(°)	LL(°)	TK(°)	B1 [†] (mm)	B2 [†] (mm)
0° (no brace) (n=25)	Mean	-2.5	16.4	13.9	36.4	50.4	50.7	31.5	-1.2	-45.2
	SD	3.0	7.3	5.3	7.0	9.1	8.7	7.0	19.6	18.8
15° (n=25)	Mean	10.7 [†]	5.9 [†]	16.6	34.3	50.9	45.9 [†]	33.1	23.1 [†]	-27.5 [†]
	SD	5.9	10.6	7.3	8.9	8.9	10.5	7.8	36.4	39.9
30° (n=25)	Mean	17.8 [†]	-2.3 [†]	15.5	34.9	50.4	42.7 [†]	30.7	47.6 [†]	5.5 [†]
	SD	7.8	13.1	8.7	9.9	9.5	10.3	6.7	43.5	53.2

* B1 means sagittal balance with reference point of the superoposterior corner of S1 and B2 means sagittal balance with reference point of the bicoxofemoral axis.

† Significantly different compared with parameters at 0° knee setting (p<0.05).

Table 2. The response of spinopelvic alignment and sagittal balance by correction of knee flexion contracture with TKRA

Preop	LL	PT	SS	PI	TK	FTA	FPA	B1 (mm)	B2 (mm)
	44.1	21.5	37.9	59.4	27.2	8.3	13.2	50.5	-6.3
Postop	LL	PT	SS	PI	TK	FTA	FPA	B1	B2
	48.1	20.8	38.1	58.9	27.4	3.9	16.9	39.3	-9.8
Difference	4.0	-0.7	0.2	-0.5	0.2	-4.4	3.7	43.0	-3.5
p-value*	0.001	0.513	0.861	0.631	0.962	0.002	0.040	0.026	0.982

Table 3. The comparison of spinopelvic alignment and sagittal balance between normal young volunteers and patients with loss of lumbar lordosis

Normal (n=25)	LL	PT	SS	PI	TK	FTA	FPA	B1	B2
	50.7	13.9	36.4	51.1	31.5	-2.4	16.4	-1.2	-45.2
Loss of LL (n=14)	LL	PT	SS	PI	TK	FTA	FPA	B1	B2
	26.9	27.1	24.3	51.4	23.8	0.0	27.0	47.7	-18.2
Difference	-23.8	13.2	-12.1	0.3	-7.7	2.4	10.6	48.9	27
p-value*	0.001	0.001	0.007	0.935	0.024	0.046	0.005	0.001	0.032

Table 4. Changes of spinopelvic and sagittal balance parameters after postoperative restoration of lumbar lordosis

Normal	LL	PT	SS	PI	TK	FTA	FPA	B1	B2
	50.7	13.9	36.4	51.1	31.5	-2.4	16.4	-1.2	-45.2
Preop	LL	PT	SS	PI	TK	FTA	FPA	B1 (mm)	B2 (mm)
	26.9	27.1	24.3	51.4	23.8	0.0	27.0	47.7	-18.2
Postop	LL	PT	SS	PI	TK	FTA	FPA	B1	B2
	33.3	23.6	27.0	50.7	24.6	-2.2	25.9	32.6	-25.8
Difference	6.4	-3.5	2.7	-0.7	0.8	-2.2	-1.2	-15.1	-7.6
p-value*	0.005	0.005	0.069	0.602	0.649	0.036	0.244	0.301	0.535

만이 감소하고 또한 슬관절에서 굴곡구축이 동반된 경우에는 전자의 반응이 일어날 수 있다고 생각된다.

슬관절의 굴곡구축을 교정하였을 경우 척추와 골반의 반응

이 경우는 슬관절의 퇴행성변화로 굴곡구축이 있는 환자에서 슬관절전치환술(TKRA)를 시행하였을 경우 척추에 어떠한 반응이 나타나는가를 보므로써 짐작할 수 있다.

10명의 양측 TKRA를 시행한 환자에서 다음과 같은 결과를 얻었다. 이들의 수술전 굴곡구축은 평균 16.8도이었으며 수술 후에는 평균 4.4도로 호전되었다(Table 2).

슬관절전치환술로 슬관절의 굴곡구축을 완화시켰을 경

우 고관절이 신전되나 PT의 변화는 없으며 요추전만이 유의하게 증가하는 것을 볼 수 있다. 또한 시상균형도 좀더 후방전위되는 것을 볼 수 있다.

요추전만의 소실시 슬관절과 고관절의 반응

3분절이상의 장분절 고정술을 시행한 14명의 환자를 분석한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다(Table 3).

이들의 요추전만각은 정상에 비하여 유의하게 감소되어 있었으며 pelvic compensation이 일어나 PT가 유의하게 증가하며 동시에 고관절도 신전되는 것을 볼 수 있다. 이와 함께 SS이 감소되며 이는 고관절을 신전시키므로써 보상하는 것으로 생각된다. 또한 FTA가 유의하게 증가

되는 것으로 보아 슬관절도 굴곡이 일어나는 것으로 생각된다. 아울러 시상균형은 보다 전방으로 전위되는 것을 볼 수 있다.

요추전만을 회복하였을 때 슬관절과 고관절의 반응

이들 14명에서 수술을 시행한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다(Table 4).

즉, 이들은 수술전에 비하여 요추전만각은 유의하게 증가하였으나 정상보다는 유의하게 적었으며 이는 불충분한 전만각의 회복을 의미한다. 전만각이 증가함에 따라 골반의 전방회전이 일어나 PT가 감소하나 이 역시 정상보다는 아직 큰 값을 보여 아직도 골반에서의 보상이 일어나고 있음을 알 수 있다. 그러나 FPA는 큰 변화가 없어 아직도 여전히 고관절이 신전된 상태로 보상하고 있으며 동시에 FTA는 수술전에 비하여 유의하게 감소하여 정상적인 슬관절의 시상정렬을 보인다. 이는 수술전에는 고관절뿐만 아니라 슬관절에서의 보상이 되고 있었으나 수술 후에는 슬관절에서의 보상까지는 필요없고 고관절에서의 보상으로 유지되고 있는 것을 알 수 있다. 즉, 요추전만이 감소할 경우 우선적으로 고관절에서 보상이 일어나고 부족한 경우 슬관절까지 보상이 요구됨을 알 수 있다.

결론

이상을 요약하면 슬관절의 이상이 일차 이상일때는 이로 인하여 고관절은 굴곡되고 요추전만이 감소하며 시상균형이 전방이동하며 이를 교정하게되면 고관절은 신전되고 요추전만이 증가하며 시상균형은 후방이동하게 된다. 요추전만의 감소가 일차 이상일 경우에는 시상균형이 전방이동하며 고관절이 신전되고 슬관절이 굴곡하여 보상하게 된다. 이를 교정하면 시상균형은 후방이동하면서 슬관절이 신전되고 고관절의 신전은 감소하게 되나 요추전만의 회복이 불충분할 경우에는 이에 대한 보상으로 고관절의 신전은 남아있게 된다.

REFERENCES

1. Roussouly P, Nnadi C. Sagittal plane deformity: an overview of interpretation and management. *Eur Spine J.* 2010;19:1824-36.

2. Min K, Hahn F, Leonardi M. Lumbar spinal osteotomy for kyphosis in ankylosing spondylitis: the significance of the whole body kyphosis angle. *J Spinal Disord Tech.* 2007;20:149-53.

3. Takemitsu Y, Harada Y, Iwahara T, et al. Lumbar degenerative kyphosis. Clinical, radiological and epidemiological studies. *Spine (Phila Pa 1976).* 1988;13:1317-26.

4. Glassman SD, Bridwell K, Dimar JR, et al. The impact of positive sagittal balance in adult spinal deformity. *Spine (Phila Pa 1976).* 2005;30:2024-9.

5. Schwab F, Lafage V, Patel A, et al. Sagittal plane considerations and the pelvis in the adult patient. *Spine (Phila Pa 1976).* 2009;34:1828-33.

6. Bernhardt M, Bridwell KH. Segmental analysis of the sagittal plane alignment of the normal thoracic and lumbar spines and thoracolumbar junction. *Spine (Phila Pa 1976).* 1989;14:717-21.

7. Berthonnaud E, Dimnet J, Roussouly P, et al. Analysis of the sagittal balance of the spine and pelvis using shape and orientation parameters. *J Spinal Disord Tech.* 2005;18:40-7.

8. Gelb DE, Lenke LG, Bridwell KH, et al. An analysis of sagittal spinal alignment in 100 asymptomatic middle and older aged volunteers. *Spine (Phila Pa 1976).* 1995;20:1351-8.

9. Jackson RP, Hales C. Congruent spinopelvic alignment on standing lateral radiographs of adult volunteers. *Spine (Phila Pa 1976).* 2000;25:2808-15.

10. Vaz G, Roussouly P, Berthonnaud E, et al. Sagittal morphology and equilibrium of pelvis and spine. *Eur Spine J.* 2002;11:80-7.

11. Schwab F, Lafage V, Boyce R, et al. Gravity line analysis in adult volunteers: age-***References (cited in order of appearance)** related correlation with spinal parameters, pelvic parameters, and foot position. *Spine (Phila Pa 1976).* 2006;31:E959-67.

12. Yoshimoto H, Sato S, Masuda T, et al. Spinopelvic alignment in patients with osteoarthritis of the hip: a radiographic comparison to patients with low back pain. *Spine (Phila Pa 1976)* 2005;30:1650-7.

13. Ben-Galim P, Ben-Galim T, Rand N, et al. Hip-spine syndrome: the effect of total hip replacement surgery on low back pain in severe osteoarthritis of the hip. *Spine (Phila Pa 1976)* 2007;32:2099-102.

14. Offierski CM, MacNab I. Hip-spine syndrome. *Spine (Phila Pa 1976).* 1983;8:316-21.

15. Tsuji T, Matsuyama Y, Goto M, et al. Knee-spine syndrome: correlation between sacral inclination and patellofemoral joint pain. *J Orthop Sci.* 2002;7:519-23.

16. Murata Y, Takahashi K, Yamagata M, et al. The knee-spine syndrome. Association between lumbar lordosis and extension of the knee. *J Bone Joint Surg Br* 2003;85:95-9.
17. Wright SP, Wolfinger RD. Repeated Measures Analysis using Mixed Models: Some Simulation Results. New York: Springer-Verlag, 1996.
18. Cohen J. Statistical Power Analysis for the Behavioural Sciences. 2nd ed. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates, 1988.
19. Vialle R, Levassor N, Rillardon L, et al. Radiographic analysis of the sagittal alignment and balance of the spine in asymptomatic subjects. *J Bone Joint Surg Am.* 2005;87:260-7.
20. Lafage V, Schwab F, Patel A, et al. Pelvic tilt and truncal inclination: two key radiographic parameters in the setting of adults with spinal deformity. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2009;34:E599-606.
21. Legaye J, Duval-Beaupere G, Hecquet J, et al. Pelvic incidence: a fundamental pelvic parameter for three-dimensional regulation of spinal sagittal curves. *Eur Spine J.* 1998;7:99-103.
22. Mac-Thiong JM, Labelle H, Berthounaud E, et al. Sagittal spinopelvic balance in normal children and adolescents. *Eur Spine J.* 2007;16:227-34.
23. John JF, Fisher PE. Radiographic determination of the anatomic hip joint center. A cadaver study. *Acta Orthop Scand.* 1994;65:509-10.
24. Schwab F, Patel A, Ungar B, et al. Adult spinal deformity-postoperative standing imbalance: how much can you tolerate? An overview of key parameters in assessing alignment and planning corrective surgery. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2010;35:2224-31.
25. Lazenec JY, Ramare S, Arafati N, et al. Sagittal alignment in lumbosacral fusion: relations between radiological parameters and pain. *Eur Spine J.* 2000;9:47-55.
26. Rose PS, Bridwell KH, Lenke LG, et al. Role of pelvic incidence, thoracic kyphosis, and patient factors on sagittal plane correction following pedicle subtraction osteotomy. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2009;34:785-91.
27. Cho KJ, Suk SI, Park SR, et al. Risk factors of sagittal decompensation after long posterior instrumentation and fusion for degenerative lumbar scoliosis. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2010;35:1595-601.
28. Boulay C, Tardieu C, Hecquet J, et al. Sagittal alignment of spine and pelvis regulated by pelvic incidence: standard values and prediction of lordosis. *Eur Spine J.* 2006;15:415-22.
29. Mac-Thiong JM, Roussouly P, Berthounaud E, et al. Sagittal parameters of global spinal balance: normative values from a prospective cohort of seven hundred nine caucasian asymptomatic adults. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2010;35:E1193-8.

시상면상 불균형에 대한 보상기전

이 증 서

성균관대학교의과대학 정형외과학교실

실제로 요추와 슬관절의 퇴행성변화가 함께 발생하는 경우가 매우 흔하며 이 두가지 구조물은 서로의 시상면상 정렬에 영향을 주고 있다. 따라서, 이 두관절이 시상면상 불균형을 보상하는 가전을 이해하기 위하여는 슬관절과 고관절에서 어떠한 작용이 일어나는지를 이해하는 것이 매우 중요하다. 그러나 이제까지의 대부분의 연구는 척추내와 고관절까지의 변화에 국한되었고 슬관절을 포함한 하지의 역할에 대한 연구는 매우 미미하다. 슬관절과 고관절에서의 보상기전을 이해하기 위하여 다음과 같은 4가지 상황에 대한 연구를 시행하였다.

1. 슬관절의 굴곡구축에 대한 척추와 골반의 정상적인 반응
2. 슬관절의 굴곡구축을 교정하였을 경우 척추와 골반의 반응
3. 요추전만의 소실시 슬관절과 고관절의 반응
4. 요추전만을 회복하였을 때 슬관절과 고관절의 반응

이들 연구결과 다음과 같은 연구 결과를 얻었다. 슬관절의 이상이 일차 이상일때는 이로 인하여 고관절은 굴곡되고 요추전만이 감소하며 시상면상이 전방이동하며 이를 교정하게되면 고관절은 신전되고 요추전만이 증가하며 시상면상은 후방이동하게 된다. 요추전만의 감소가 일차 이상일 경우에는 시상면상이 전방이동하며 고관절이 신전되고 슬관절이 굴곡하여 보상하게 된다. 이를 교정하면 시상면상은 후방이동하면서 슬관절이 신전되고 고관절의 신전은 감소하게 되나 요추전만의 회복이 불충분할 경우에는 이에 대한 보상으로 고관절의 신전은 남아있게 된다.

색인 단어: 슬관절, 고관절, 시상면상불균형, 보상기전