

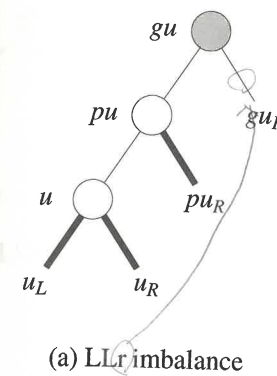
불균형의 특징을 분류한다. 성질 RB2가 위배되었으므로 2개의 연속적인 레드 노드가 있다는 것을 주목하라. 이러한 레드 노드들 중 하나는 u 이고 다른 하나는 반드시 그 부모가 될 것이므로 pu 는 존재한다. pu 는 레드이므로 루트가 될 수 없다(성질 RB1에 의해 루트는 블랙이어야 하므로). 그러므로 u 는 반드시 블랙인 조부모 gu 를 가져야 한다(성질 RB2). pu 가 gu 의 왼쪽 자식일 때, u 가 pu 의 왼쪽 자식이고 gu 의 다른 자식은 블랙인 경우(이 경우는 gu 의 다른 자식이 외부 노드일 경우도 포함한다), 이런 불균형의 타입을 LLb라 한다. 다른 불균형 타입들에는 LLr(pu 가 gu 의 왼쪽 자식이고 u 는 pu 의 왼쪽 자식이며 gu 의 다른 자식이 레드인 경우), LRb(pu 는 gu 의 왼쪽 자식이고 u 는 pu 의 오른쪽 자식이며 gu 의 다른 자식이 블랙인 경우), LRr, RRb, RRR, RLb, RLr이 있다.

불균형 타입 XYr(X와 Y는 L 또는 R이 된다.)은 컬러의 변경에 의해 처리되지만, XYb 타입의 불균형은 회전이 필요하다. 컬러를 변경시킬 때, RB2 위배가 트리의 두 단계 위까지 전파될 수도 있다. 이 경우 기존의 gu 를 새로운 u 로 하여 다시 변환을 적용함으로써, 새로운 레벨에서 재분류가 필요하게 된다. 회전이 끝나고 나면 RB2 위배는 해결되며, 더 이상 해야 할 일은 없다.

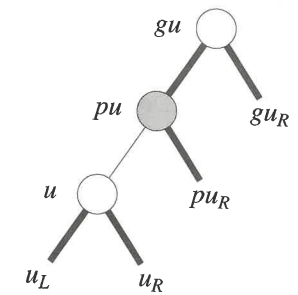
그림 10.16은 LLr과 LRr 불균형을 해결하기 위해 컬러를 변경하는 것을 보여준다. 이러한 컬러 변경은 모두 동일하다. 블랙 노드들은 회색으로 표현되었고 레드 노드들은 흰색으로 표현되어 있다. 예를 들어 그림 10.16(a)에서 gu 는 블랙이고 pu 와 u 는 레드이다. 또 gu 로부터 왼쪽과 오른쪽 자식으로 가는 포인터는 레드이다. gu_R 은 gu 의 오른쪽 서브트리이고, pu_R 은 pu 의 오른쪽 서브트리이다. LLr과 LRr 모두 pu 의 컬러와 gu 의 오른쪽 자식의 컬러를 레드에서 블랙으로 변경해야 한다. 또한 gu 가 루트가 아니라면 gu 의 컬러를 블랙에서 레드로 바꾼다. gu 가 루트일 경우 이러한 컬러 변경은 할 수 없으므로, gu 가 레드-블랙 트리의 루트일 때는 루트에서 외부 노드까지의 모든 경로상에 있는 블랙 노드의 수를 하나씩 증가시킨다.

만약 gu 의 컬러를 레드로 변경시킨 것이 불균형을 초래한다면, gu 는 새로운 노드 u 가 되고 그 부모는 새로운 pu 가 되며 그 조부모는 새로운 gu 가 되어 재균형 작업을 계속한다. gu 가 루트이거나 컬러 변경이 gu 에서 RB2 위배를 일으키지 않는다면, 재균형 작업은 다 끝난다.

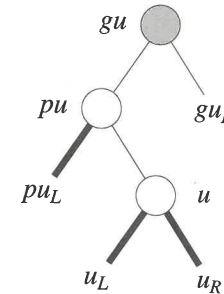
그림 10.17은 LLb와 LRb 불균형을 처리하는 회전을 보여주고 있다. 그림 10.17(a)와 (b)에서 u 는 pu_L 의 루트이다. AVL 트리에서 삽입 후 발생하는 불균형을 처리하기 위해 사용된 LL(그림 10.12 참조), LR(그림 10.13 참조) 회전들과 이 회전들 사이의 유사점에 주목하라. 포인터 변경은 동일하다. 예를 들어 LLb 회전의 경우, 포인터 변경과 더불어 gu 의 컬러를 블랙에서 레드로 바꾸고 pu 의 컬러를 레드에서 블랙으로 바꾸는 것이 필요하다.



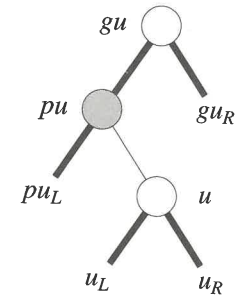
(a) LLr imbalance



(b) After LLr color change



(c) LRr imbalance



(d) After LRr color change

그림 10.16 LLr과 LRr 컬러 변경

그림 10.17의 회전 후에 노드(또는 포인터)의 컬러를 검사함으로써, 루트에서 외부 노드로 가는 모든 경로상에 있는 블랙 노드(또는 포인터)의 수가 변하지 않았음을 알 수 있다. 또한 연관된 서브트리의 루트(회전 전의 gu 와 회전 후의 pu)가 회전 후에 블랙이므로, 트리의 루트에서 새로운 pu 까지의 경로상에 2개의 연속적인 레드 노드가 존재할 수 없다. 결과적으로, 추가적인 재균형 작업은 없게 된다. 단일 회전(single rotation)[$O(\log n)$ 컬러 변경이 선행될 수 있는]으로 충분히 삽입 후에 균형을 회복시킬 수 있다!

예제 10.4: 그림 10.18(a)의 레드-블랙 트리를 생각해보자. 편의상 외부 노드를 나타내었다. 실제 구현에서는 외부 노드로의 블랙 포인터는 단순히 널 포인터이고 외부 노드는