

서울지하철 터널내의 지하수 유입량에 대한 비교 연구

우종태^{1*}

A study on comparison of a ground water influx quantity in Seoul subway tunnel

Jong-Tae Woo

Abstract As ground water influx quantity which flows into the tunnel inside from the 7.937 km section of Han River and small and 7 medium-sized rivers which pass through subway line 5 is average 34,444 m³/day and it's 55.3% of the underground water influx quantity 62,272 m³/day which flows into whole tunnel section 31.29 km. If we suppressed the underground water influx from the rivers, it would be expect that the maintenance and management expenses would be able to reduce a lot. In addition, as the result of investigating the difference between the ground water influx quantity which flows into the river section and that of the design standard, the ground water influx quantity is 3.01 m³/min and it is flowing to similar level of tunnel design standard 3.00 m³/min. However, when it is compared with tunnel average influx quantity 1.38 m³/min, it has been found that 2.18 times of ground water flows into rivers.

Keywords: Ground water, influx quantity, han river, tunnel

요 지 서울지하철 5호선을 통과하고 있는 한강 및 중소 7개 하천 7.937 km구간의 터널 내부로 유입되는 지하수 유입량은 평균 34,444 m³/day로 터널 전구간 31.29 km로 유입되는 지하수량 62,272 m³/day의 55.3%를 차지하고 있으므로 하천구간에서 지하수 유입을 억제한다면 유지관리 비용을 크게 절감할 수 있을 것으로 기대된다. 또한, 하천구간으로 유입되는 지하수의 양을 설계기준과 비교한 결과 유입량이 3.01 m³/min/km로서 터널 설계기준 3.0 m³/min/km과 비슷한 수준으로 유입되고 있었으나, 터널평균 유입량 1.38 m³/min/km와 비교했을 때 하천구간에서는 2.18배의 지하수가 더 유입되고 있는 것으로 나타났다.

주요어: 지하수, 유입량, 한강, 터널

1. 서 론

최근들어 사회기반시설 확충의 필요성에 따라 제한된 지상환경을 보존하고, 국토의 효율적인 활용을 위해 지하철, 도로, 국철 및 고속철도 공사 등에 터널 건설이 급격히 증가되어 터널 구조물의 설계 및 시공, 유지관리 수준이 많이 향상되고 있다. 터널은 주로 지하수위 아래에 위치하는 경우가 많으며, 터널의 방수 및 배수처리가 터널구조물의 품질에 크게 영향을 미친다. 터널구조물의 유지관리시 터널 배수시설에 영향을 미치는 요소들은 배수구배의 단차발생, 지하수의 유입, 침전물질의 유입 등으로 이는 배수장애 및 배수기능을 저하시켜 구조물 변상 및 추가적인 유지관리 비용의 증대를 초래하고 있다.

본 논문에서는 서울지하철 터널구조물의 배수계획과 배수시설의 설계 및 시공기준이 유지관리시에도 적정한 지를 검토하기 위해 서울지하철 5호선 57.9 km에 설치된 60여개의 정거장 집수정의 지하수량에 대해 1997년부터 2003년까지 분기별로 조사된 터널 내 지하수 유입 현황을 조사하고, 다양한 방법으로 지하수량을 비교분석하였다.

지하철 터널 내에서 지하수 유입량 분석내용으로는 지하철 5호선에 대한 전체 집수정의 지하수 유입량을 분석하였고, 지형별 및 하천 통과구간의 지하수 유입량을 분석하였으며, 하천 통과구간의 지하철 3호선, 4호선 및 5호선의 지하수 유입량을 비교·분석하여 지하철 집수정 및 터널구간 유입량의 설계 기준과 비교하여 향후 터널 설계 및 시공, 유지관리에 도움이 되고자 연구를 수행하였다.

¹경북대학 건설환경정보과 교수, 공학박사, 기술사
*교신저자: 우종태 (E-mail: jtwoo@kyungbok.ac.kr)

2. 서울지하철 5호선 구간 지하수 유입량 분석

2.1 전구간 지하수 유입량 분석

배수식 터널에서 지하수 유입수량 측정은 계획 설계 수량과 비교하여 유입량의 증감이 발생할 경우에 터널 구조물 안전에 영향을 미치게 되므로 유지관리에서 매우 중요하다. 지하수 유입량이 급격히 증가할 경우 터널 배면에 유로가 형성되고 배면공동이 생길 수가 있으며, 지상 상수도 및 하수관 파열 등으로 일시에 많은 양의 외수가 지층내로 유입될 경우 터널라이닝에 급격한 수압이 작용하여 변상이 발생될 수 있고, 지하수 유입량이 급격히 감소할 경우에는 터널 인접 굴착공사 구간으로 지하수가 이동되어 부등침하가 발생할 수가 있다. 그러므로 유지관리에서 지하수 유입량 관리는 터널구조물의 안전성 유지와 시설물 관리에서 매우 중요하다. 따라서, 터널내로 유입되는 지하수 유입량이 설계기준과 차이가 있는지를 검토하기 위하여 지하철 5호선 57.9 km 구간에 설치된 60개 집수정의 지하수 유입량을 1997년 1월부터 2003년 12월까지 분기별로 조사한 결과 표 1과 같이 지하철 내부로 유입되는 일일 지하수 유입량은 약 64,199 m³/day이고, 1 km당 분당 유입량은 0.77 m³/min/km로 집수정 설계기준인 1 km당 박스구조물의 2 m³/min/km 터널구조물은 3 m³/min/km에 비해 상당한 여유가 있는 것으로 나타났다. 계절별 유입량을 연평균 유입량과 비교해 본 결과 동절기인 1/4분기에는 약 4% 감소하고, 우기철인 3/4분기에는 약 5% 증가하였는데 우기에 지하수 유입량이 증가하는 이유는 강우시 환기구 및 출입구의 개구부를 통하여 빗물이 유입되어 일시적으로 증

가할뿐 터널 상부지층을 따라 터널 내부로 유입되는 지하수 유입량은 큰 변화가 없는 것으로 판단된다.

2.2 지형별 지하수 유입량 분석

지하철 5호선에서 지형별로 지하수 유입량의 변화가 있는지를 분석하기 위하여 평지대, 하천지대, 고지대로 구분하여 조사 분석한 결과 그림 1에서와 같이 평지대는 평균 0.415 m³/min/km, 하천지대는 평균 2.758 m³/min/km, 고지대는 평균 0.873 m³/min/km로 하천 수계지역이 평지대보다 6.6배 많은 지하수가 유입되고 있으며, 5호선을 지형별로 구분하여 유입량을 분석한 결과 표 2와 같이 고지대인 군자~광나루구간에서 0.207 m³/min/km로 가장 적고, 광나루~천호 하저통과구간이 4.226 m³/min/km로 가장 많은 지하수가 유입되고 있는 것으로 나타났다. 터널 전 구간을 대상으로 지역별로 터널내부로 유입

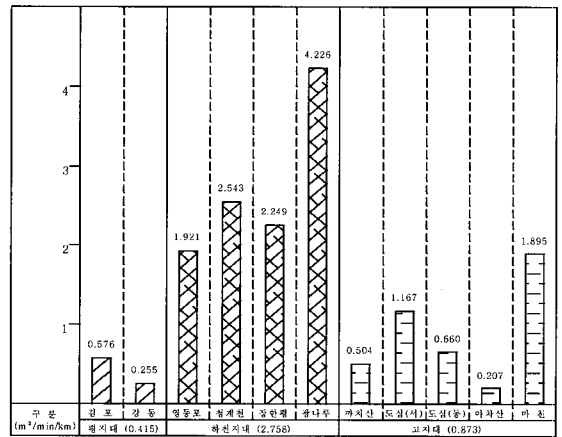


그림 1. 지하철 5호선 지형별 지하수 유입량

표 1. 지하철 5호선 연도별 지하수 유입량

(단위: m³/min)

연도	분기				평균	km당
	1/4분기	2/4분기	3/4분기	4/4분기		
평 균	42.76	43.26	46.76	45.37	44.56	0.77
1997년	41.99	45.49	48.80	47.45	45.93	0.79
1998년	44.98	44.51	56.11	51.88	49.37	0.85
1999년	41.27	41.53	44.44	41.82	42.26	0.73
2000년	42.58	42.05	41.88	41.90	42.10	0.73
2001년	44.25	41.97	43.41	42.57	43.21	0.75
2002년	41.49	43.99	45.92	46.57	44.49	0.77
2003년	44.66	40.53	41.34	40.16	41.67	0.72

표 2. 지하철 5호선 지형별 지하수 유입량

(단위: m³/min)

지역	구간	터널연장 (km)	심도 (m)	지하수 유입량	1 km당 유입량
계		31.293	-	43.342	1.38
김포	김포~마곡	0.865	9~15	0.498	0.576
까치산	화곡~신정	2.022	22~37	1.019	0.504
영등포	오목교~마포	7.370	17~33	14.162	1.921
도심(서)	마포~종로3	4.028	14~30	4.704	1.167
청계천	종로3~을지4	0.890	19~25	2.345	2.634
도심(동)	을지4~마장	5.423	19~45	3.583	0.660
장한평	마장~군자	3.475	11~18	7.817	2.249
아차산	군자~광나루	1.570	12~33	0.325	0.207
광나루	광나루~천호	0.870	16~58	3.677	4.226
강동	강동~고덕	2.346	10~15	0.598	0.255
마천	강동~마천	2.434	12~22	4.614	1.895

※ 평지대 평균: 0.415, 하천지대 평균: 2.758, 고지대 평균: 0.873 m³/min/km

표 3. 지하철 5호선 터널구간 지하수 유입현황

구분	연장	지하수 유입량	비고(m ³ /min/km)
계	31.29 km	62,272 m ³ /day	1.38
일반터널	23.35 km	27,828 m ³ /day	0.83
하천유역	7.94 km	34,444 m ³ /day	3.01

되는 지하수 유입량을 5년간 측정된 수량을 평균한 결과 표 3과 같이 1.38 m³/min/km로 설계기준 3 m³/min/km에 비해 상당한 여유가 있는 것으로 나타났다.

2.3 하천통과구간 지하수 유입량 분석

지하철 5호선을 통과하고 있는 한강 및 중소 7개 하천 구간 7.937 km 터널내부로 1일 동안 유입되는 지하수 유입량은 표 3과 같이 평균 34,444 m³/day가 유입되고 있어 터널 전구간 31.29 km로 유입되는 지하수량 62,272 m³/day의 55.3%를 차지하고 있으므로 하천구간에서의 지하수 유입을 억제한다면 유지관리 비용을 크게 절감할 수 있을 것으로 기대된다.

또한, 하천구간으로 유입되는 지하수의 양이 설계기준과 차이가 있는지를 검토한 결과 유입량이 3.01 m³/min/km로서 터널 설계기준 3.0 m³/min/km와 거의 같은 수준으로 유입되고 있으나, 터널평균 유입량 1.38 m³/min/km와 비교했을 때 하천구간에서는 2.18배의 지하수가 더 유입되고 있는 것으로 나타났다.

하천통과 구간 중 지하수 유입수량이 가장 많은 구간은 표 4에서와 같이 안양천 구간으로 평균 7.20 m³/min/km이고, 가장 적은 구간은 청계천 구간으로서 1.24 m³/min/km가 유입되고 있어 많은 차이가 있다.

지하수 유입량이 많은 순서로 보면 안양천 7.20 m³/min, 전농천 4.14 m³/min, 광나루 하저통과구간 3.45 m³/min 순이며, 지하수 유입수량이 많은 차이가 나는 이유로는 지질이나, 지형적인 문제보다는 차수그라우팅에 의한 문제가 더욱 큰 것으로 판단된다.

터널 상부토질, 터널깊이, 터널단면, 패턴이 비슷한 조건하에서 건설된 3개 하천의 지하수 유입량을 비교 분석한 결과 청계천 1.24 m³/min과 셋강 2.90 m³/min은 설계기준 이하지만, 안양천은 7.20 m³/min로 설계기준의 2.4배를 초과하고 있는 것으로 나타났다. 또한, 3개 하천에 적용된 지반보강 및 차수 그라우팅공법은 셋강과 청계천의 경우 SGR(Space Grouting Rocket system)공법, 안양천의 경우 RMG(Root Milk Grouting)공법으로 시공되었으나, 안양천의 경우는 모래 및 자갈층이 터널 인

표 4. 지하철 5호선 하천별 지하수 유입현황

(단위: m³/min)

하천명	구 간	터널 패턴	토피 (m)	상부 토질	배수연장 (km)	지하수 유입량	1 km당 유입량
계	8개소	-	-	-	7.937	23.92	3.01
안양천	오목교~양평	복선 PD-2	20~23	충적토 풍화암	0.772	5.56	7.20
셋 강	신길~여의도	복선 PD-2,3	25~32	충적토 풍화암	0.757	2.20	2.90
한 강	여의나루~마포	단선	23~31	풍화토 경암	1.546	3.13	2.02
청계천	종로3~을지4가	복선 단선	19~25	충적토 풍화암	0.890	2.34	2.63
청계천	마장~답십리	복선 PD-2,3	10.2~17.4	충적토 풍화암	0.767	0.95	1.24
전농천	답십리~장한평	복선 단선 PD-2,3	16.6~22.0	충적토 풍화암	1.045	4.33	4.14
중랑천	장한평~근자	단선 PS-2,3	12.4~20.3	풍화암 연암	1.290	2.41	1.87
한 강	광나루~천호	복선 PD-2	22~34	풍화토 풍화암	0.870	3.00	3.45

표 5. 광나루집수정 중앙배수관 지하수 유입량 비교

구 분			유입량 (m ³ /min)
보수공사 전	1996년	06월	4.05
		12월	4.61
	1997년	06월	4.29
		12월	4.25
	1998년	06월	4.30
		12월	5.24
보수공사 후	1999년	06월	0.49
		12월	0.48
	2000년	06월	0.79
		12월	0.53
	2001년	06월	0.58
		12월	0.57
	2002년	06월	0.53
		12월	0.35
	2003년	06월	0.40
		12월	0.35
	2004년	06월	0.37

버트부까지 분포하고 터널 연장도 상대적으로 길기 때문에 지하수 유입량이 많았던 것으로 판단된다.

한강 통과구간 중 여의나루~마포간 하저터널 구간의 지하수 유입량이 2.02 m³/min로 적은 것은 비배수식 전 주방수공법으로 시공되었기 때문이며, 광나루구간은 3.45 m³/min이지만, 표 5와 같이 '96~'98년까지는 최대 일일 5.24 m³/min까지 유입되었으나, 손상된 중앙배수관 밀폐 후 0.49 m³/min으로 1/11로 감소되었다.

광나루구간이 지하수 유입량이 많았던 이유는 한강의 높은 수압이 작용하고 있는데도 일반터널과 같은 형식으로 중앙배수관을 부설함으로써 250 KPa의 높은 수압 작용으로 많은 지하수가 유입되면서 배수관을 손상시켰기 때문이었다. 광나루 하저통과 구간 중 한강구간은 파쇄대층과 단층대가 터널 기반암까지 깊게 발달되어 있어 터널을 설치할 경우에는 많은 지하수가 유입될 것에 대비하여 가물막이 개착공법으로 건설하였고, 좌, 우 둔치는 배수식 터널공법으로 건설하였다. 광나루방향인 광나루~한강 터널 540 m구간은 배수구배가 한강하저 박스구조물에 설치된 집수정으로 형성되어 있어 원활한

배수처리 위하여 터널 중앙배수관을 박스구조물 하부를 통과시켜 집수정까지 연결 시공하였다.

개통 이후 1998년 3월 집수정내부에 다량의 모래 및 자갈이 유입된 것을 발견하고 배수관내부를 조사한 결과 개착구간 박스구조물 하부에 부설된 배수관 이음부에서 다량의 지하수와 함께 모래 및 자갈이 유입되고 있으며, 그 원인은 박스구조물의 지층이 단층파쇄대로 형성되어 한강수위 이하 25 m 침투수두에 의한 높은 침투수압 250 KPa이 배수관에 직접 작용하여 배수관 이음부를 손상시켰고, 그 배수관 이음부를 통하여 다량의 지하수와 함께 모래 및 자갈이 집수정으로 유입되고 있었다.

만약 이로 인하여 박스구조물 배면에 공동이 발생될 경우 구조물 안전성이 우려되어 개착 박스구간에 부설된 연장 65 m 배수관을 밀폐시킨 결과 표 5와 같이 1998년

12월에 유입량 5.24 m³/min이 유입되던 지하수가 보수 공사 완료 후인 1999년 6월 0.49 m³/min만이 유입되었다.

따라서, 배수관이 부설되는 지층의 특성을 고려하지 않고, 일반구간과 동일한 방법으로 배수관을 부설함으로써 발생된 현상이므로 지하수가 과다하게 유입되는 구간은 시공단계에서 차수 및 지수 그라우팅 시행과 터널 배수시스템에서 드레인 보드 등을 적용하여 유지관리에 대비하는 대책 검토가 필요하다.

3. 서울지하철 호선별 하천통과구간 지하수 유입량 분석

하천구간의 터널이 심도별로 차이가 있는지를 알아보기 위하여 지하철 3, 4호선 5개 하천구간과 지하철 5호선 8개 하천구간의 지하수 유입량을 표 6 및 표 7과 같

표 6. 지하철 3, 4호선 하천통과구간 지하수 유입량

하천명	구 간	집수정유입량(m ³ /min)		펌프용량 (m ³ /min×대수)	터널구조	배수형식
		설계	실측			
평 균	-	5개소	1.55	-	-	-
청계천	종로3~을지3	3.43	2.41	1.77×3	단선병렬	비배수식
반포천	고속T~교대	6.17	0.35	3.2×3	2-Arch	비배수식
홍제천	홍 제	3.53	2.30	1.82×3	단선병렬	배수식
4호선 청계천	동대문~운동장	5.90	1.80	3.00×3	단선병렬	비배수식
정능천	길 음	2.43	0.87	1.27×3	단선병렬	비배수식

표 7. 지하철 5호선 하천통과구간 지하수 유입량

하천명	구 간	집수정유입량(m ³ /min)		펌프용량 (m ³ /min×대수)	터널구조	배수형식
		설계	실측			
평 균	-	8개소	2.99	-	-	-
안양천	오목교~양평	3.0	5.56	3.83×3 1.8×3	복선	배수식
셋 강	신길~여의도	-	2.20	2.17×4	복선	배수식
한 강	여의나루~마포	2.6	3.13	4.5×8 1.2×3	단선병렬	비배수식
청계천	종로3~을지4	-	2.34	2.22×4	단선병렬	배수식
청계천	마장~답십리	2.29	0.95	2.0×3 1.2×1	복선	배수식
전농천	답십리~장한평	-	4.33	2.2×6	복선	배수식
중랑천	장한평~군자	3.27	2.41	3.7×4	단선병렬	배수식
한 강	광나루~천호	3.42	3.00	2.4×9 1.83×1	단선병렬	배수식

이 조사하였다.

지하철 3, 4호선의 지하수 유입량은 5개 하천 평균 1.55 m³/min이고, 5호선은 8개 하천 평균 2.99 m³/min으로 5호선 하천통과구간이 3, 4호선에 비해 1.93배 더 많은 지하수가 유입되고 있는데, 그 원인을 분석해 보면 3, 4호선은 5개 하천 중 4개 하천을 비배수식 방수공법으로 시공하였고, 5호선은 8개 하천 중 1개 하천만 비배수식 방수공법으로 건설되었기 때문이다.

터널 심도별 지하수 유입량을 비교해 보면, 지하철 3, 4호선의 터널 평균심도는 16 m이고, 지하철 5호선은 터널 평균심도가 24.6 m로 5호선이 8.6 m 더 깊지만 3호선 청계천구간 비배수식은 2.41 m³/min과 5호선 청계천구간 배수식은 2.34 m³/min이 비슷한 유입량을 보이고 있으므로 심도에 의한 영향은 거의 없는 것으로 판단된다.

4. 결론

지하철 5호선에 설치된 60개 집수정의 지하수 유입량을 1997년부터 2003년 말까지 분기별로 조사한 결과 지하철 내부로 유입되는 지하수 유입량은 약 64,339 m³/day이고, 1 km당 분당 유입량은 0.77 m³/min/km로 집수정 설계기준 박스구조물 2 m³/min/km, 터널구조물 3 m³/min/km을 고려했을 때 상당한 여유가 있는 것으로 나타났으며, 계절별 유입량을 연평균 유입량과 비교해 본 결과 동절기인 1/4분기에는 약 4% 감소하고, 우기철인 3/4분기에는 약 5% 증가하였으나, 이는 강우시 환기구 및 출입구의 개구부를 통하여 빗물이 유입되어 일시적으로 증가할 뿐 터널 상부지층을 따라 터널 내부로 유입되는 지하수 유입량은 큰 변화가 없는 것으로 판단된다.

지하철 5호선을 통과하고 있는 한강 및 중소 7개 하천 7.937 km구간 터널내부로 유입되는 지하수 유입량은 평균 34,444 m³/day가 유입되고 있어 터널 전구간 31.29 km로 유입되는 지하수량 62,272 m³/day의 55.3%를 차지하고 있으므로 하천구간에서 지하수 유입을 억제한다면 유지관리 비용이 크게 절감할 수 있을 것으로 기대된다.

한강 통과구간 중 여의나루~마포간 하저터널구간의 지하수 유입량이 2.02 m³/min로 적은 것은 비배수식 전주방수공법으로 시공되었기 때문이며, 광나루구간은 평균 3.45 m³/min이지만 '96-98년까지는 일일 최대 5.24 m³/min까지 유입되었으나, 손상된 중앙배수관 밀폐 후

0.49 m³/min으로 1/11로 감소되었다. 광나루구간이 지하수 유입량이 많았던 이유는 한강의 높은 수압이 작용하고 있는데도 일반터널과 같은 형식으로 중앙배수관을 부설함으로써 250 kpa의 높은 수압작용으로 많은 지하수가 유입되면서 배수관을 손상시켰기 때문이었다.

결국 터널 중앙배수관 부설 시 지층과 지형적인 조건에 대한 특성을 고려한 배수관부설과 적합한 그라우팅 공법을 선정하여 시공한다면 지하수 유입은 크게 줄일 수 있을 것으로 판단된다.

지하철 3, 4호선의 지하수 유입량은 5개 하천 평균 1.55 m³/min이고, 5호선은 8개 하천 평균 2.99 m³/min으로 5호선 하천통과구간이 3, 4호선에 비해 1.93배 더 많은 지하수가 유입되고 있는데, 그 원인은 3, 4호선은 5개 하천 중 4개 하천을 비배수식방수공법으로 시공하였고, 5호선은 8개 하천 중 1개 하천만 비배수식 방수공법으로 건설되었기 때문이다.

참고문헌

1. 건설교통부, 한국터널공학회 (2007), “터널설계기준”, pp. 67-72.
2. 대한토목학회 (1996), “서울지하철 터널 방수개념 정립을 위한 연구”, pp. 14-21.
3. 박인준, 송명규, 신휴성, 박용수 (2008), “도심지 터널 응축수 발생구간에서의 수리 역해석 및 수리-역학 연계 해석을 통한 안정성 해석 연구”, 터널기술, 한국터널공학회 논문집, 제10권, 제4호, pp. 397-404.
4. 서울특별시 지하철건설본부 (1993), “안양천 터널구간 배수방법검토 종합보고서”, 대우엔지니어링, pp. 24-30.
5. 신종호, 남택수, 채성은, 유재웅 (2009), “이중구조 라이닝의 배수공 막힘에 따른 수리-역학적 상호작용”, 터널기술, 한국터널공학회 논문집, 제11권, 제3호, pp. 243-254.
6. 우종태 (1997), “지하철 터널(NATM)방수에 대한 고찰”, 서울특별시 지하철건설본부 제2기 지하철건설기술사례 제5호, pp. 375-397.
7. 우종태 (1997), “한강 하저터널 구조물 설계 및 시공(II)”, 서울특별시 지하철건설본부, pp. 337-353.
8. 우종태, 이 송 (2004), “지하철 하천통과구간의 지하수 유입량 비교연구”, 한국구조물진단학회 가을학술발표회논문집, pp. 219-222.
9. 우종태 (2005), “도심지터널에 유입된 지하수량 및 침전물의 성분분석 연구”, 한국터널공학회 논문집, 제7권, 제3호, pp. 219-226.

10. 정형식 외 (2004), “전력구 터널의 침투수에 대한 설계 기법 및 기준에 관한 연구”, 한국터널공학회 정기학술 발표 논문집, pp. 144-156.
11. 한국지반공학회 (1998), “통신구 터널의 방수설계 기술 연구”, 한국통신, pp. 28-39.
12. 한국터널공학회 (2009), “터널표준시방서”, pp. 67-71.
13. 日本tunnel協會, “防水工 設計 施工 技術”, 坪城7年.

점수일(2009.9.9), 수정일(1차: 2009.10.12, 2차: 2009.10.15), 게재 확정일(2009.10.20)