

합리식의 수정유출계수 적용성 검토



유 창 열
(주)동아기술공사수자원부상무
ycr8680@hitel.net

1. 서론

합리식은 구조가 간단하고 사용이 편리하기 때문에 수문학적 기초가 미흡한 기술자도 쉽게 이용할 수 있는 침투 유출량 산정방법으로 건설공무원의 약 50% 이상이 설계 홍수량 추정에 사용하고 있는 방법으로 조사된 사실도 있다(건설부, 1991). 그러나, 합리식은 간편하다는 장점이면서 논리적 근거와 거동을 실제로 증명할 수 없다는 한계성으로 인하여 많은 수문학자들로부터 비판을 받고 있다. 특히 지체시간공식으로 유명한 Linsely는 1980년 Water Resources Research를 통해 합리식 사용에 대하여 유감을 표명하기도 하였다.

합리식은 Mulvany(1850)에 의해 개념이 제시되었고, Kuichling(1889)가 유출량, 강우강도, 유역의 크기 및 도달시간 등과의 관계를 증명하여 미국내 미계측유역에 대한 합리식을 제시하였다.

국내의 경우 김지호(2003), 예창열(2003), 허영현(2005) 등은 합리식 적용에 있어 유출계수 산정에 논리성을 부여하고자 GIS를 활용하거나, 수정유출계수를 산정, 제시하고 SCS의 CN과 유출계수를 비교하는 방법 등으로 유출계수의 적용성을 높이는 연구를 수행하였다. 허영현의 연구는 이후 이영대 등(2007)이 부산지역의 강우자료를 이용한 연구를 통해 유출계수와 강우량 및 CN과의 관계식을 도출하는 것으로 발전하였다.

금번 검토에서는 최근 제시되어진 방법중 김지호(2003)가 제시한 경사도 및 재현기간을 고려한 유출계수를 이용하여 유역면적 1.0km²내외의 시험유역에 대하여 침투유출량을 산정한 결과와 실제관측치 비교를 통하여 적정성을 확인해 보았다.

검토결과중 2002년까지는 김지호(2003)의 연구결과를 인용하였으며 2003~2006년 기간은 금치 산정하여 추가하였다.

2. 합리식의 기본원리

2.1 합리식의 이론

Mulvany(1850)는 합리식을 다음의 식(2.1)과 같이 제시하였다.

$$Q = 2.52CIA \quad (2.1)$$

여기서 Q는 첨두유출량(ft³/sec), C는 유출계수(평평한 지대 1/3, 경사진 지대 2/3), I는 최대강우강도(3/2~2 in/hr), A는 유역면적(acre)이다.

Kuichling(1889)는 식(2.1)을 수정하여 다음 식(2.2)를 제시하였다.

$$Q = FCIA \quad (2.2)$$

여기서 Q는 첨두유출량(ft³/sec), C는 무차원유출계수, I는 강우강도(in/hr), A는 유역면적(acre), F는 단위환산계수이다. A와 I가 각각 km², mm/hr의 단위를 가진다면 F는 0.2778이 되며 식(2.2)는 다음 식(2.3)으로 변환된다. 이때의 Q는 m³/sec의 단위를 갖는다.

$$Q = \frac{1}{3.6} FCIA = 0.2778CIA \quad (2.3)$$

A*가 ha의 단위를 가진다면 식(2.3)은 다음 식(2.4)으로 변환된다.

$$Q = \frac{1}{360} CIA^* \quad (2.4)$$

2.2 유출계수

하천설계기준·해설(한국수자원학회, 2005)에서는 유출계수에 대하여 유역의 형상, 지표면피복상태, 식생피복상태 및 개발상황 등을 감안하여 결정하는 것으로 하나, 자연하천 유역 및 토지이용에 따른 유출계수는 다음 Table 2.1~2.2를 적용하도록 하고 있다. 참고로 일본에서 적용하고 있는 합리식 유출계수도 다음 Table 2.4에 수록

하였다.

정중호 등(2007)은 수자원설계실무(제2판)에서 하천설계기준·해설(2005)의 기준인 Table 2.1을 대부분 적용하고 있으나 실제 적용시 항목 채택 및 넓은 범위에서 적절한 값 채택 등에 대한 상세기준이 제시되지 못하고 있으므로 유출계수의 적용이 주관적이라는 문제점을 제기하였다. 아울러 산지의 유출계수에 있어 Table 2.5에 따라 0.75 이상을 채택함으로 인하여 첨두홍수량이 과다 산정되는 경우가 많이 있었다는 점을 지적하고 Table 2.1에서 아스팔트 도로의 유출계수가 0.7부터 시작되는 점과 Table 2.4 및 Table 2.2에서 산지의 유출계수를 각각 0.6 이하 및 0.4~0.6의 범위를 제시하고 있는 점을 근거로 산지의 유출계수는 0.6이하를 채택하도록 제시하고 있다.

(표-2.1) 토지 이용도에 따른 합리식의 유출계수 범위*1 (Ponce, 1989)

토지 이용		기본유출계수C	토지 이용		기본유출계수C			
상업 지역	도심지역	0.70-0.95	차도 및 보도		0.75-0.85			
	근린지역	0.50-0.70	지붕		0.75-0.95			
주거 지역	단독주택*	0.30-0.50	잔디	사질토	평탄지	0.05-0.10		
	독립주택단지	0.40-0.60		사질토	평균	0.10-0.15		
	연립주택단지	0.60-0.75	중토	경사지	경사지	0.15-0.20		
	교외지역	0.25-0.40		중토	평균	0.13-0.17		
	아파트	0.50-0.70		중토	경사지	0.18-0.22		
산업 지역	산재지역	0.50-0.80	나지	평탄한 곳	0.30-0.60			
	밀집지역	0.60-0.90		가친곳	0.20-0.50			
공원, 묘역	공원, 묘역	0.10-0.25	농경지	사질토	작물 있음	0.30-0.60		
	운동장	0.20-0.35			사질토	작물 없음	0.20-0.50	
	철로	0.20-0.40		중토	중토	작물 있음	0.20-0.40	
	미개발지역	미개발지역			0.10-0.30	중토	작물 없음	0.10-0.25
						관개 중인 답	0.70-0.80	
도로	아스팔트 콘크리트 벽돌	0.70-0.95 0.80-0.95 0.70-0.85	초지	사질토	0.15-0.45			
				중토	0.05-0.25			
			산지*	급경사 산지	0.40-0.80			
				완경사 산지	0.30-0.70			

주1) 유출계수는 재현기간 5-10년에 적용되므로 재현기간이 이보다 길 경우에는 Ponce(1989, Engineering Hydrology)등의 보정그래프를 활용토록 한다.

주2) 단독주택인 경우 미국의 주거사항과 한국의 주거사항이 같지 않으므로 유출계수 추정시 주의를 요한다.

주3) 산지의 경우 유출계수 추정시 현장조건을 감안한 판단이 필요하며, 유역 면적이 작은 지역에서는 비교적 큰 유출계수를 사용하고 유역면적이 큰 지역에서는 비교적 작은 유출계수를 사용하여 홍수량이 과소 또는 과다 추정되지 않도록 유의한다.

(표-2.2) 합리식 유출계수의 지형과 지질에 따른 보정(Stephenson, 1981)

지표상형	보정치 : 가감량
나 지	경사 < 5% : -0.05
	경사 > 10% : +0.05
초 지	재현기간 < 20yr : -0.05
경작지	재현기간 > 50yr : +0.05
삼 림	연평균 강수량 < 600 mm : -0.03
	연평균 강수량 > 900 mm : +0.03

(표-2.3) 일본의 유출계수(일본건설성, 1984)

구분	유역상태	유출계수	구분	유역상태	유출계수
하천정비	밀집 도시지역	0.9	소규모 하수도시설	지붕	0.80~0.95
	일반 도시지역	0.8		도로	0.80~0.90
	농업지역	0.6		기타불투수지역	0.75~0.85
	논	0.7		수면지역	1.00
	산지지역	0.7		미개발지역	0.10~0.30
대규모 하수도시설	상업지역	0.7~0.9		공원지역	0.05~0.25
	산업지역	0.4~0.6		완경사 산지	0.20~0.40
	주거지역	0.3~0.5		급경사 산지	0.40~0.60
	공원지역	0.1~0.2			

주1) 소규모 하수도시설기준은 우리나라 하수도시설기준(한국상하수도협회, 2005)에서도 준용

(표-2.4) 자연유역의 유출계수(Schwab, 1971)

유역상태		토양구조		
		토양구조 (open sandy loam)	점토 및 양토 (clay and loam)	조밀한 점토 (tight clay)
산지 (woodland)	0~ 5% 경사	0.10	0.30	0.40
	5~10% 경사	0.25	0.35	0.50
	10~30% 경사	0.30	0.50	0.60
초지 (pasture)	0~ 5% 경사	0.10	0.30	0.40
	5~10% 경사	0.16	0.36	0.55
	10~30% 경사	0.22	0.42	0.60
경작지 (cultivated land)	0~ 5% 경사	0.30	0.50	0.60
	5~10% 경사	0.40	0.60	0.70
	10~30% 경사	0.52	0.72	0.82

(표-2.5) 평균유출계수 (자연하천유역)(윤용남, 1986)

유역상태	유출계수
急傾斜 山地	0.75~0.90
起伏이 있는 土地와 樹林	0.50~0.75
평탄한 田地	0.45~0.60
灌溉중인 畝	0.70~0.80
山地 河川	0.75~0.85
平地 河川	0.45~0.75
流域의 雨이상이 平地인 大河川	0.50~0.75

3. 수정 유출계수

미국토목학회에서 제안된 유출계수는 재현기간 10년 이하의 홍수량을 산정할 때 사용하며, 재현기간과 표면의 경사도에 따라 유출계수값이 변화한다. 따라서 이러한 변화값을 반영한 수정유출계수의 산정이 지속적으로 이루어지고 있다. 국내의 경우 한국건설기술연구원(1994)에서 평창강, 위천, 보청천 유역에서 확률론적 방법으로 유출계수와 재현기간의 관계를 연구한 바 있으며 그 결과는 다음 Table 3.1과 같다. 여기서 C_t/C_{10} 값은 1982~1993년 기간의 12개년 수위 및 강우량자료를 이용하여 10년빈도 유출계수값을 지표 유출계수 C_{10} 으로 고정된 후 나머지 빈도(재현기간)의 유출계수를 C_t 로 두고 비율을 구한 값이다.

(표-3.1) 평창강, 위천 및 보청천 유역의 C_t/C_{10}

유역	2년	5년	10년	20년	50년
평창강과 위천의 평균	0.70	0.88	1.00	1.10	1.24
보청천	0.58	0.80	1.00	1.23	1.60

하천설계기준(한국수자원학회, 2000)에 합리식 적용이 유효한 유역면적이 10km^2 이하임을 고려하면 평창강 519.69km^2 , 위천 472.53km^2 , 보청천 475.68km^2 로 적용이 곤란한 유역면적이다. 따라서 한국건설기술연구원에서는 보청천의 신뢰도만을 언급하였으나 3개하천 모두 상기 표에 의한 유출계수 적용은 신뢰성을 얻기 어려울 것으로 여겨진다.

김지호(2003)는 미국토목학회에서 제안된 도시지역의 유출계수를 경사도와 재현기간에 따라 세분화하였으며, 산지지역의 경우 워싱턴주 수송국에서 제안한 유출계수를 기준으로 제시하여 국내유역에서 검증은 하였다.

다음 Table 3.2는 토지이용특성별로 경사도(2%이하, 2~10%, 10%이상)에 따라 분류하였으며 재현기간 10년~100년까지 세분화하여 제시한 수정유출계수, C_m 이다.

4. 적용성검토

4.1 대상유역 선정

건교부는 국제수문개발10개년계획(International Hydrological Decade, IHD)사업의 후속사업으로 진행된 국제수문개발계획(International Hydrological Program, IHP)중 한강유역의 평창강, 금강유역의 보청천, 낙동강유역의 위천을 대표시험유역으로 선정하여 수문관측과 분석을 수행하고 있다.

또한 과학기술부에서 진행중인 21세기 프론티어 연구개발사업 중, 수자원의 지속적 확보기술사업의 일부분으로 "지표수조사개발"사업에서 6개 유역에 대하여 수행하고 있다.

IHP에서 수행중인 유역은 중규모유역으로 합리식의 적용에 부적합하므로 과학기술부에서 진행중인 유역을 대상으로 연구를 시행하였다. 그 중 섬강 유역도 유역면적이 커서 제외하였으며 수위-유량곡선식이 개발되지 않은 발안유역도 제외되었다. CN-C관계식 개발이 부산지방의 강우자료를 기초로 만들어졌음에도 불구하고 동의대유역도 수위-유량곡선식이 개발되지 않은 점을 고려하여 제외하였다. 결과적으로 신뢰할 만한 자료가 지속적으로 축적중인 설마천 유역을 연구대상유역으로 선정하였다.

(표-4.1) 국내 시험 유역

유역명	위치	유역면적 (km ²)	유로연장 (km)	연구내용	시유량자료 확보년	
과 학 기 술 부	섬마천 유역	경기도 파주시 적성면 일대 (2개 소유역)	5.08 ~ 8.50	3.1 ~ 5.8	산지 소유역의 물 순환과정을 규명 하고 관측자료 생성하기 위해 1995년부터 시행	1997년 3월
		경기도 화성시 봉담읍 일대 (14개 소유역)	4.10 ~ 26.50	1.63 ~ 1.44	농업 소유역의 물 순환 과정 규명하고 발안저수지 유역을 대상으로 수문/수질 모니터링을 1996년부터 시행	
	이동 유역	경기도 용인시 0문천남사면일대 (5개 소유역)	4.39 ~ 94.40	2.61 ~ 14.4	효율적인 농업용수 계획, 관리에 관한 연구개발을 위해 정량적 자료 축적을 위해 2000년부터 시행	

(표-4.1) 국내 시험 유역(계속)

유역명	위치	유역면적 (km ²)	유로연장 (km)	연구내용	시유량자료 확보년	
과 학 기 술 부	응담 유역	전북 진안군, 무주군, 진안군 (6개 소유역) 일대	32.60 ~ 282.4	-	하천환경조사체계 수립을 통한 하천유역 종합관리 방법론 연구를 위해 1998년 시행	2001년 3월
		동의대 유역	부산진구 가야동 동의대 일대 (5개 소유역)	0.063 ~ 0.159	0.732 ~ 1.917	도시 배수체계에 의한 강우시 유출 변화 특성 파악 2001년부터시행
	섬강 유역	강원도 횡성군 (3개 소유역)	75.76 ~ 165.63	14.39 ~ 22.41	신뢰성 있는 고품질의 산지 유역 수문자료 확보 하기 위해 2000년도부터 시행	2002년 3월
I H P	평창강 유역	남한강 상류부	519.69 ~ 165.63	51.85 ~ 22.41	국제수문개발계획의 일환으로 시험유역 설정	-
	보청천 유역	금강 상류부	475.68	49.00	국제수문개발계획의 일환으로 시험유역 설정	-
	위천 유역	낙동강 중류부	472.53	42.83	국제수문개발계획의 일환으로 시험유역 설정	-

4.2 수정유출계수적용

수정유출계수를 적용하여 시험유역에 대한 침투유출량을 산정한 결과는 Table 4.5와 같다.

(표-4.5) 확률론적 합리식 산정결과

월/일/년	최대강우강도 (mm/h)	최대유출 A (m ³ /s)	확률론적 합리식 B (m ³ /s)	유량비 A/B
7/01/1997	14.300	11,170	6,483	0.580
7/03/1997	1,800	0,730	0,816	1,118
7/05/1997	7,400	3,810	3,355	0,881
7/15/1997	39,100	13,460	17,727	1,317
6/26/1998	12,700	2,514	5,758	2,290
7/08/1998	13,600	0,836	6,166	7,375
7/09/1998	13,200	4,929	5,984	1,214
7/16/1998	14,500	8,497	6,574	0,774
8/01/1998	12,100	2,777	5,486	1,975
8/03/1998	10,600	1,400	4,806	3,433
8/04/1998	14,100	9,347	6,393	0,684
8/06/1998	27,300	39,996	12,377	0,309
8/08/1998	35,200	37,330	15,959	0,428
8/11/1998	36,200	22,646	16,412	0,725
8/15/1998	19,700	10,136	8,931	0,881
9/05/1998	17,500	2,334	7,934	3,399
9/21/1998	38,300	7,575	17,364	2,292
7/10/1999	13,900	1,639	6,302	3,845
7/22/1999	57,700	23,591	26,159	1,109
7/24/1999	54,800	23,395	24,845	1,062
8/01/1999	76,200	116,521	34,547	0,296
9/19/1999	32,00	9,903	14,508	1,465
7/22/2000	22,300	3,146	10,110	3,214
8/05/2000	38,500	7,711	17,455	2,264

(표-4.5) 확률론적 합리식 산정결과 (계속)

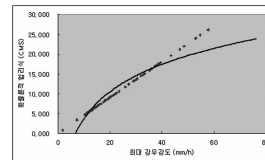
월/일/년	최대강우강도 (mm/h)	최대유출 A (m ³ /s)	확률론적 합리식 B (m ³ /s)	유량비 A/B
8/07/2000	14,700	2,437	6,665	2,735
8/20/2000	7,400	1,972	3,355	1,701
8/25/2000	19,700	10,921	8,931	0,818
8/28/2000	37,400	50,725	16,956	0,334
9/01/2000	12,100	7,970	5,486	0,688
9/16/2000	12,000	14,202	5,440	0,383
6/18/2001	35,800	1,590	16,231	10,208
6/30/2001	18,300	15,065	8,297	0,551
7/05/2001	23,600	7,134	10,700	1,500
7/15/2001	48,600	33,045	22,034	0,667
7/21/2001	29,000	2,635	13,148	4,990
7/22/2001	12,000	3,064	5,440	1,776
7/30/2001	35,500	33,045	16,095	0,487
8/15/2001	20,000	3,346	9,067	2,710
9/06/2001	12,700	0,331	5,758	17,395
6/20/2002	12,694	0,210	5,755	27,405
7/02/2002	15,676	0,261	7,107	27,230
7/06/2002	16,488	5,654	7,475	1,322
7/19/2002	15,637	5,889	7,089	1,204
7/24/2002	12,972	11,486	5,881	0,512
8/05/2002	52,946	110,628	24,004	0,217
8/23/2002	13,886	0,774	6,295	8,134
8/26/2002	19,698	2,169	8,930	4,117
8/27/2002	18,378	4,883	8,332	1,706
9/01/2002	10,545	7,910	4,781	0,604
5/17/2003	22,016	0,086	9,981	116,058
6/29/2003	14,113	1,478	6,398	4,329
7/09/2003	15,242	1,346	6,910	5,134
7/22/2003	29,919	17,822	13,563	0,761
7/27/2003	15,806	5,654	7,165	1,267
8/03/2003	19,758	1,337	8,957	6,699
8/06/2003	39,515	56,147	17,913	0,319
8/20/2003	43,467	14,236	19,705	1,384
8/24/2003	46,854	35,483	21,240	0,599
9/07/2003	11,290	1,131	5,118	4,525
9/18/2003	33,306	32,337	15,099	0,467
2/21/2004	20,322	1,568	9,213	5,876
5/09/2004	11,855	0,713	5,374	7,537
5/28/2004	11,855	1,716	5,374	3,132
7/06/2004	12,419	4,550	5,630	1,237
7/12/2004	38,386	47,953	17,402	0,363
7/17/2004	15,242	11,206	6,910	0,617
8/05/2004	29,919	1,401	13,563	9,681
8/14/2004	14,113	0,086	6,398	74,395
8/17/2004	22,016	1,439	9,981	6,936
9/07/2004	11,855	1,364	5,374	3,940
9/12/2004	17,500	2,854	7,933	2,780
9/16/2004	18,064	1,274	8,189	6,428
10/12/2004	12,984	0,091	5,886	64,681
6/27/2005	25,967	1,942	11,772	6,062
7/01/2005	37,822	8,898	17,146	1,927

(표-4.5) 확률론적 합리식 산정결과 (계속)

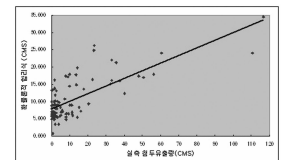
월/일/년	최대강우강도 (mm/h)	최대유출 A (m ³ /s)	확률론적 합리식 B (m ³ /s)	유량비 A/B
7/09/2005	14,113	7,936	6,398	0,806
7/25/2005	29,354	0,164	13,307	81,140
7/28/2005	14,677	2,080	6,654	3,199
7/30/2005	13,548	0,686	6,142	8,953
8/01/2005	15,242	1,026	6,910	6,735
8/02/2005	39,515	9,902	17,913	1,809
8/09/2005	30,483	1,589	13,819	8,697
8/10/2005	22,580	1,881	10,236	5,442
8/24/2005	19,758	0,241	8,957	37,166
8/28/2005	12,984	1,621	5,886	3,631
9/13/2005	21,451	4,153	9,724	2,341
9/17/2005	32,741	13,564	14,843	1,094
5/05/2006	17,500	0,067	7,933	118,403
6/09/2006	19,193	0,068	8,701	127,956
6/14/2006	15,242	5,180	6,910	1,334
6/29/2006	12,419	0,119	5,630	47,311
7/09/2006	10,726	0,097	4,862	50,124
7/13/2006	53,063	60,449	24,055	0,398
7/16/2006	20,661	20,354	9,366	0,460
7/27/2006	15,806	16,152	7,165	0,444
7/29/2006	14,677	2,310	6,654	2,881
10/23/2006	15,242	0,675	6,910	10,237

주1) 2002년까지는 김지호(2003) 산정결과 인용

검토결과에 따르면 산정한 첨두유출량을 실제관측치와 비교해보면 0.7349의 상관계수를 갖는 것으로 나타났다.



(Fig 4.1) 최대 강우강도와 계산된 첨두유출량



(Fig 4.2) 실제 첨두유출량과 계산된 첨두유출량

5. 결론

본 검토에서는 첨두유출량 산정방법에서 간단한 구조를 가지고 있으므로 빈번한 사용빈도를 갖고 있지만 유출계수 산정에 대한 객관성 결여로 산정결과에 대한 신뢰성을 의심받는 합리식에 대하여 최근 개선방법으로 연구되고 있는 방법중 수정유출계수의 적용에 대하여 첨두유출량을 산정해 보고 시험유역의 실제유출관측치와 비교함으로써 실제 적용성에 대한 검토를 시행하였다.

시험유역으로는 설마천유역을 선정하였으며 관측소위

치는 영국군 전적비교 지점을 선정하였다. 실측자료는 1997~2006년까지의 자료이며, 산정된 침투유출량과 실측유출량을 회귀분석하여 상관계수를 비교하였다.

산정결과를 요약하면, 수정유출계수를 이용한 경우 상관계수는 0.7349로 실측치와 상당한 값의 차이를 나타내고 있으며, 경사도, CN값 산정 등의 과정을 거쳐야하므로 합리식의 장점인 간편성과는 다소 거리가 있다. 또한 합리식은 사용과 구조의 간편성에도 불구하고 금번 검토와 같이 개선방법에 있어서도 실측치와 상당한 차이를 나타내고 있다.

참고문헌

- 강우 ~ 유출 해석의 기초와 응용 - 합리식에 의한 침투유량의 추정 - 이순혁 (한국농공학회지, 1983, 제 25권 3호)
- 도시 소규모 단지의 우수유출량 산정기법의 연구 - 서병하, 이홍래, 김형우, 전병호 (1989. 한국토지개발공사)

- 도시유역에서의 우수유출에 관한 연구 III : 합리식과 SCS Model을 중심으로 - 이순탁, 박정규 (1990. 연구보고 제 18, 2, 영남대학교 공업기술연구소)
- 소유역의 침투홍수량 추정을 위한 합리식의 개설 - 학문집(고려대학교 공과대학, 1992. 제 33호) 윤용남, 최원석 석사논문
- 미계수 유역의 홍수유출 특성에 관한 비교연구 (최종) : 합리식을 중심으로 - 김남원 (1994. 12. 한국건설기술연구소)
- 설계홍수량 추정개념과 합리식의 논리적 고찰 - 김남원 (건설기술연구원, 1995) - 수자원학회 논문집
- 합리식 적용을 위한 도시내 토지이용별 유출계수 조사연구 - 이재철, 박공춘, 한형근 1997
- 소하천유역의 지형요소를 고려한 유출특성에 관한 연구 : 도달시간에 대하여 - 유효상 (2003. 8. 진주산업대 석사논문)
- 우리나라 하천유역의 합리식 유출계수 산정에 관한 연구 - 김지호 (2003. 홍익대 박사논문)
- 수정유출계수를 이용한 확률론적 합리식에 관한 연구 - 예창열 (석사학위 논문, 2003. 홍익대학교)
- NRCS의 CN과 합리식의 유출배수 (C) 와의 관계 연구 - 부경대학교 산업대학원, 허영현 (2005. 06. 석사논문)