2002 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

원전 2차계통 배관재의 침식-부식 손상

Erosion-corrosion of Secondary Side Piping Components in Nuclear Power Plant

이은희*, 허도행, 한정호, 김우철
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요약

탄소강의 침식-부식 현상에 영향을 미치는 수력학적 요인, 환경적 요인 그리고 재료적 요인 등을 전산코드를 사용한 모의시험을 통하여 평가하였다. 배관의 감육률은 컴포넌트들과 관련된 모든 변수들의 복합적인 상호작용에 의존하였다. 가장 효과적으로 감육률을 감소시키는 방법은 배관의 재질을 향상시키는 것이었다. 전산코드에 의한 침식-부식 평가는 발전소 현장에 많은 도움이 될 것이다.

Abstract

The important factors(thermodynamic, environmental, material) affecting erosion-corrosion of carbon steel are simulated with computer program. The wear rate of pipings depends on a complex interplay of many parameters. The most effective method to reduce the wear rate was material improvement. The results would contribute to aid utilities where corrosion damages have experienced because of wall thinning.

1.서론

1986년 미국의 Surry Unit 2 발전소에서 발생한 급수배관의 대형 파손 사고가 침식-부식(erosion-corrosion) 현상에 의해 발생한 것으로 밝혀졌다[1]. 이후, 조사결과 많은 원자력발전소(원전)들이 이와 유사한 손상을 경험한 것으로 나타났으며 원전 2차계통에 광범위하게 사용되는 탄소강과 저합금강 재질에서 많이 발생하였다. 침식-부식에 의한 배관 파손은 개인의 안전뿐만 아니라 원전의 안전성 확보 및 가동률 향상 그리고 수명연장 측면에 심각한 영향을 미친다.

침식-부식은 부식성 유체와 금속 표면 산화막의 상대적 물질 이동에 기인하여 부식 속도가 증가 또는 가속되는 현상으로 정의되며 유체 흐름의 가속에 의한 부식(flow-accelerated corrosion) 혹은 침식-부식(erosion-corrosion)으로 표현되기도 한다. 이러한 침식-부식 현상은

빠른 유속의 단상(water) 또는 2상(water-wet steam)의 유체속에서 일어나며 2상 조건에서 특히 민감하나[2-4] Surry 발전소 경우처럼 단상 조건에서도 관찰되는 것으로 보고 되었다[5-7]. 이 현상에 영향을 미치는 주요 인자들은 수력학적 요인(유속, 배관의 기하학적 형상), 환경적 요인(온도, pH, 산소농도, 불순물) 그리고 재료적 요인(재질의 화학조성) 등이 있다[2,6]. Heitmann 등이 [4] 여러 종류의 상업용 강을 사용하여 유속과 온도 영향에 관해 연구하였고 또 위의 인자들 각각이 침식-부식에 미치는 영향에 관한 많은 보고가 있었다[6,10,11]. 그러나 침식-부식 민감도는 이들의 복합적인 상호작용에 의해 지배되기 때문에 이러한 인자들의 영향을 종합적으로 고려하여 이에 의한 손상 거동을 평가해야 한다. 그리고 단기간의 시험 결과로 장기간에 걸쳐 진행되는 침식-부식 손상을 예측, 평가하면 커다란 잘못을 범할 수 있으므로 주의해야 한다.

Surry 발전소 사고 이후 원전 배관재들의 침식-부식에 의한 배관의 감육속도와 잔존수명을 예측하고 이의 관리를 위해 미국의 EPRI(Electric Power Research Institute)에서 CHECMATE 코드를 개발하였다[12]. 본 연구에서는 현재 여러 나라에서 사용 중이며 신뢰성이 검정된 이 CHECMATE 코드를 사용하여 국내 원전 2차계통에서도 나타나는 이러한 침식-부식 손상을 원전의 여러 가지 기초자료를 사용하여 운전조건 및 재질 변화에 의한 영향을 평가해 보았다.

2. 실험방법

2.1 시험계통 선정

국내 원전 중에서 가동연수가 긴 A 원전에서 2차측 배관재의 침식-부식에 의한 손상이 많이 발견되고 있으며 일부 배관재에 대한 교체 작업도 진행되었다. 1988년에 복수기 전열관이 cupronickel 에서 titanium 합금으로 교체되었고 2차측 수질관리는 암모니아와 하이드라진이 사용되었으며 최근에는 에타놀아민으로 변경하였다. 이 원전의 여러 계통중에서 시험 분석하기로 결정한 계통은 주급수계통 중 일부 라인들로 배관재질은 A-106Gr.B, C 그리고 A-234WPC 등으로 크롬농도가 ~0.03% 수준으로 침식-부식 손상이 많이 발생하고 있는 탄소강들이다. 이 계통은 단상계이나 가동온도가 침식-부식에 민감한 145°C(293°F)를 포함한 185°C(363°F) 그리고 223°C(450°F)이며 운전압력, 엔탈피, pH 그리고 유속등이 차이가 나는 라인들로 구성되어 침식-부식 현상에 영향을 미치는 주요 인자들의 영향을 상호 평가할 수 있다.

2.2 배관의 감육률 계산

EPRI로부터 CHECMATE 코드를 구매한 후 이에 관한 검토 및 분석 작업을 하였다. 계산 수행을 위한 입력자료 체계는 동일 수화학 조건과 운전시간 이력을 갖는 case data form, 같은 case에 해당하며 동일 설계압력과 설계온도로 구성되는 segment data form 그리고 같은 segment를 구성하는 배관계통의 각 구성 부분(예, 엘보우, 티, 리듀셔, 밸브, 파이프, …등)에 해당하는 component data form으로 이루어진다. Table 1에 해당 입력체계의 주요 입력 자료들을 기술하였으며 각 입력 항목에 관한 설명은 전산코드 매뉴얼에 자세히 나와 있으므로 생략하였다[12]. 감육률 계산을 하기 위해 필요한 자료들은 heat balance diagram, P&ID drawings, isometric drawings, 수화학 조건자료, 운전시간 자료, 재질 spec. 관련 자료, 배관 교체이력 그리고 검사자료 등이다. Table 2에 시험 분석할 계통의 설계온도와 설계압력을 나타냈다. 앞에서 선정한 주급수 계통에 대해 위에서 언급된 모든 자료들을 수집하고 분석, 정리하였다. SE1에서 SE6까지 라인은 동일 수화학과 운전이력을 가지는 case data에 속하며 SE1 SE2, SE3 SE4 그리고 SE5 SE6는 segment data에 해당한다. 분석할 계통의 수화학 시험조건들은 Table 3에 나타냈으며 이 조건들

은 A 원전의 실제 수화학 운전조건은 아니다. 이들 모든 자료들을 이용하여 CHECMATE 코드의 입력 체계에 맞게 자료들을 구성하였다. 이렇게 생성된 원전의 입력자료 파일을 이용하여 배관의 감육률 계산을 수행하기 위한 CHECMATE 코드의 흐름도는 Fig. 1과 같다. 본 연구에서는 시험 계통의 기초 자료들을 사용하여 전산코드를 이용한 모의시험을 통하여 컴포넌트의 기하학적 형상, 유속, 온도, pH, 용존산소 농도 그리고 재질의 화학 조성등 배관감육에 영향을 미치는 여러 가지 인자들에 의한 감육경향 분석에 중점을 두었다. 그리고 아민 용액의 고온 pH는 Framatome 사에서 개발한 Framona 코드를 구매하여 계산하였다

3. 실험결과 및 고찰

3.1 수력학적 요인

Fig. 2는 Table 3의 시험 3에서 용존산소의 농도가 5ppb 일 때의 결과로 6개 각 라인에 속한 배관 컴포넌트들을 감육률이 큰 순서대로 비교한 것이다. 같은 온도로 운전되었을 때는(SE1, SE2) 유속이 빠를수록 감육률이 컸다. 운전 온도가 145°C에서 185°C 그리고 223°C로 증가할수록 감육률은 상대적으로 감소하였다. 즉 145°C에서 운전되었고 유속이 SE1 계통보다 빠른 SE2 계통의 컴포넌트들의 감육률이 가장 높았다. 그리고 각 계통에서는 컴포넌트들의 기하학적 형상에 따라 감육률이 감소하였다. Fig. 2에서 감육률 순위 4 정도까지는 컴포넌트들의 기하학적 형상이 밸브나 티이며 그 다음부터 10 정도는 엘보우 그리고 마지막이 파이프 형상을 나타냈다. 같은 엘보우 구조라도 90°형이 45°형(CHECMATE geometry code) 보다 감육률이 높았으며 파이프인 경우에는 연결 컴포넌트들의 기하학적 구조에 따라 감육률이 조금씩 차이가 났다(Table 4). Fig.3은 유속의 변화에 따른 엘보우 컴포넌트의 감육률을 나타낸 것이다. 많은 실험 결과들에서 고온 탈산소중 탄소강의 감육률은 유속의 영향을 크게 받는다고 보고하였다[6]. 본 시험결과 145°C 와 185°C로 운전되었을 때는 엘보우 컴포넌트의 감육률은 유속에 비례하였으나 온도가 223°C로 증가되었을 때는 거의 영향을 받지 않았다. CHECMATE 코드에 의한 모의시험 결과 배관의 감육률은 컴포넌트들의 기하학적 구조, 온도, 유속등과의 복합적인 작용에 의존하였다.

3.2 환경적 요인

3.2.1 온도 영향

온도는 탄소강과 저합금강의 침식-부식 저항성에 영향을 미치는 중요한 인자이다. Fig. 4는 시험 3의 조건이며(Table 2) 단상계 탄소강 배관재들의 145°C, 185°C 그리고 223°C 운전조건에서 시험한 결과이다. 145°C로 운전된 계통중의 엘보우 컴포넌트는 9.5와 6.9mils/year, 185°C로 운전된 계통에서는 7.9와 5.4mils/year 그리고 223°C로 운전된 계통에서는 4.7, 3.5, 3.5 그리고 3.8 mils/year의 감육률을 보였다. 대부분의 연구결과에 따르면 단상조건의 경우 80°C~230°C에서 2상 조건의 경우 이보다 높은 140°C~260°C의 온도 범위에서 침식-부식이 가장 많이 발견되는 것으로 알려져 있다[10.11]. 본 시험에서는 145°C 와 185°C 온도에서 높은 감육률을 보였고 같은 온도에서는 유속이 빠를수록 증가하였다. 그러나 온도가 223°C일 때는 유속은 크게 증가하였지만 감육률에 큰 영향을 미치지 않았다. 즉 온도의 영향이 유속등 다른 인자들의 영향보다 컸으며 본 연구에서 시험한 온도중 145°C에서 침식-부식에 의한 감육률이 가장 높았다.

3.2.2 용존산소 농도 영향

수중의 용존 산소의 존재가 침식-부식 저항성을 향상시킨다는 연구결과가 많이 보고되어 왔다. Fig. 5는 시험 3의 조건에서 (Table 2) 산소농도를 5ppb에서 100ppb까지 증가시킨 SE2 계통중

엘보우 컴포넌트의 감육률을 보인 결과이다. 용존산소 농도가 5ppb에서 20ppb로 증가하였을 때 감육률은 약 1/2, 100ppb 일 때는 약 1/10으로 감소하였다. 수중의 산소농도 증가는 탄소강의 침식-부식을 억제하나 염소 또는 황화물 이온과 같은 부식성 음이온이 존재할 때는 부식속도가 매우 커지므로 물의 순도를 잘 유지해야 한다.

3.2.3 pH 영향

Fig. 6은 Table 2 조건에서 시험한 결과로 아민의 종류와 관계없이 엘보우 컴포넌트의 감육률은 pH의 증가와 함께 감소하였다. pH가 같을 때는(Fig. 2) 온도가 145°C로 운전되고 유속이 빠를수록 감육률이 높았다. 모르폴린이 첨가되었을 때는 암모니아 첨가시보다 약 1/3배 정도 감육률이 감소하였다. 모르폴린 첨가시 감육률이 낮게 나타난 것은 고온에서 높은 pH 값(Table 5) 때문이라고 해석된다. 그러나 암모니아에 비해 염기성이 낮으므로 pH를 조절하기 위해 고농도가 요구되며 고온 분해 생성물인 유기산이 계통내의 부식에 미치는 영향도 고려해야 한다. 최근에는 고염기성 물질로 pH 조절시 적은 몰농도가 필요한 ethanolamine(ETA)의 사용이 검토되고 있으며 국내 원전에도 적용되고 있다. 시험 운전 결과 부식 생성물뿐만 아니라 유기산의 양도 적게 검출되었다[13].

3.3 재료적 요인

강의 화학 조성도 고온의 물과 증기(wet steam) 중 침식-부식 거동에 큰 영향을 미치며 특히 탄소강의 경우 민감도가 매우 크다[8]. Fig. 7은 파이프 컴포넌트의 감육률을 여러 종류의 상업용 강을 사용하여 유속과 온도와의 관계를 나타낸 것이다. 크롬 성분이 0.03wt% 함유한 A106 Gr.B 탄소강을 크롬성분이 0.58wt%인 강으로 대체하였을 때 빠른 유속과 침식-부식에 민감한 온도 범위 조건에서 감육률이 거의 1/11배 만큼 감소하였다. 크롬 성분이 1%로 증가하면 0.03wt% 일 때보다 약 1/30배 만큼 감소하였다. 유속이 14.8, 17.1, 그리고 18.9ft/sec로 비슷할 때 온도 변화에 따른 여러 가지 저합금강의 감육률 변화를 비교해 보면 온도가 145°C 와 185°C 로 운전될 때는 감육률이 비슷하였으나 온도가 223°C일 때는 1/2배 이상 감소하였다. 유속에 의한 영향보다 온도에 의한 감육률이 더 컸다. 1wt% 이하의 크롬이 첨가되었을 때는 유속과 온도에 따라 감육률이 영향을 받았으나 크롬 성분의 함량이 2wt% 이상인 A335 P22 재질로 시험했을 때는 더 이상 온도, 유속등의 영향을 받지 않았다. 크롬 함량을 증가시킨 저합금강의 침식-부식 저항성의 향상은 고온의 물조건에서 시험된 1크롬-0.5몰리강의 산화막을 분석한 결과에 의하면[15], 선택적인 철의 용해가 크롬 성분을 많이 함유하는 산화막을 형성시키는 것으로 나타났다. 이러한 크롬 산화물은 고온의 물 분위기에서 용해도가 낮으므로 FAC 저항성을 향상시키는 것 같다.

4. 결론

1. 배관의 감육률은 컴포넌트들의 기하학적 구조, 온도, 유속등과의 복합적인 작용에 의존하였다.
2. 145°C 에서 감육률이 가장 높았고 수중의 산소농도 증가 및 pH 증가에 따라 감육률이 감소하였다.
3. 재료의 크롬함량을 높였을 때 컴포넌트의 감육률이 가장 감소하였다.
4. 전산코드에 의한 모의시험 자료는 발전소 현장에 많은 도움이 될 것이다.

References

1. C.J. Czajkowski, NUREG/CR-4868, Brookhaven National Labotatory (1987)
2. G.A. Delp et al., EPRI NP 3944, Palo Alto, CA, Apr., (1985)
3. R.Svoboda et al., Erosion-Corrosion of Power Generating Equipment, M.O. special and A. Artens, eds., p.269, Plenum Press, New York, (1984)
4. J.P. Cerdan et al., Conf. ADERP, Electricite de France, Seillac, France, Mar., (1980)
5. G.J. Bignold et al., Nucl. Engr. Int., June, p.37 (1981)
6. G.J. Bignold et al., Water Chemistry of Nuclear Reactor System 2, BNES, London, p.3 (1981)
7. Ph. Berge et al., Water Chemistry of Nuclear Reactor System 2, BNES, London, p.19 (1981)
8. G. Cragnolino, CORROSION/ 87, NACE, Houston, Texas, paper No.86., (1987)
9. Water Chemistry of Nuclear Reactor System 3, Vol. 1 and 2, BNES, London, (1983)
10. G.J. bignold et al., Electricite de France, Les Renardieres, France, May, paper No.12 (1982)
11. M. Izumiya et al., Water Chemistry and Corrosion Products in Nuclear Power Plants, IAEA, Vienna, Austria, p.61 (1983)
12. Chexal,V.K., Dietrich, E.B., et al., CHECMATE Computer Users Manual, EPRI Report, NSAC-145L, Rev.1, April
13. K.K. Park, S.W. Yoon, J. Corros. Soc. of Korea, 29, 6 (2000)

Table 1 Input data for computer code

Case data	Segment data	Component data
전체 운전 시간 amine pH, oxygen	설계압력, 설계온도 source/operating 압력 line 형태, line 번호 source enthalpy or quality, sink 압력 단열재 두께, 단열재 열전도도 배관재 내면 거칠기	기하학적 형태 코드 번호 material 번호, diameter, schedule/thickness, flow rate thermodynamic state, R/D, orientation, orifice size, valve coefficient, pipe length TDAT, 측정시간, inspection status

Table 2 Design conditions of piping segments

Line	Temperature(℉)		Pressure(psig)		Enthalpy (Btu/lbm)
	Design	Operation	Design	Operation	
SE1	300	292	150	50	262
SE2	390	293	400	315	263
SE3	390	363	400	315	336
SE4	450	365	1550	1153	339
SE5	450	434	1550	1153	413
SE6	450	434	1550	1153	413

Table 3 Test conditions of components for computer simulation

Test No.	Amine type	pH	Oxygen (ppb)	Material	No. of hours
1	ammonia	9.0	5	A234WPB A106Gr.B,C	10000
2	ammonia	9.3			
3	ammonia	9.5	5	A234WPB, A106Gr.B,C, A335 P2, A335 P11, A335 P22	
			8,10,15, 20,50,100	A234WPB, A106Gr.B,C,	
4	ammonia	9.8	5		
5	ammonia	10			
6	morpholine	9.5			

Table 4 Effect of geometry code on wear rate of components

Line	Component	Geometry code*	Wear rate mils/year
SE2	elbow	2	9.5
	elbow	1	7.4
	pipe	52	6.2
	pipe	60	5.6
	pipe	58	5.2
	pipe	67	4.9
SE4	elbow	2	7.9
	elbow	1	6.1
	pipe	52	5.1
	pipe	57	5.1
	pipe	58	4.3
SE6	pipe	52	2.3
	pipe	58	1.9
	pipe	9	1.3

* CHECMATE Computer Program
User's Manual NSAC/145L[12]

Table 5 Calculated pH of ammonia and morpholine using the FRAMONA Code at 145°C

Item	pH(25 ℃)	9.0	9.3	9.5	9.8	10
pH (145 ℃)	ammonia	6.325	6.575	6.753	7.031	7.222
	morpholine	6.537	6.836	7.037	7.338	7.538

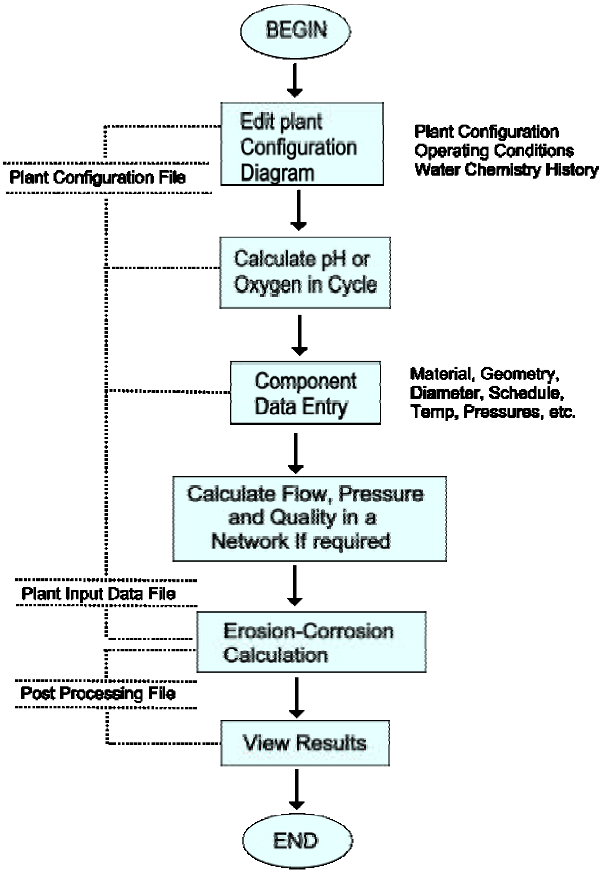


Fig. 1　Flow chart of computer code

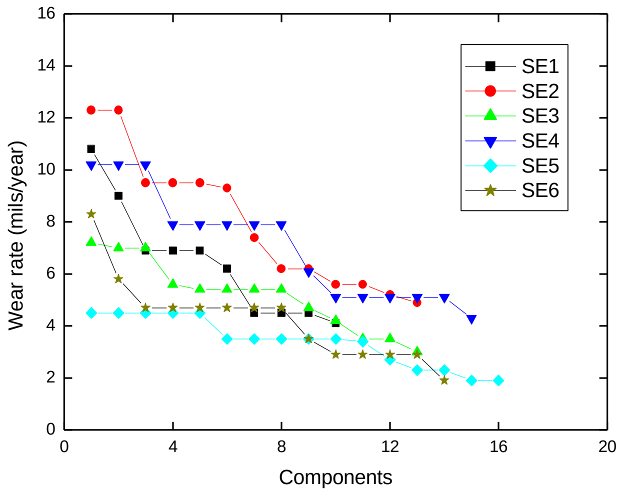


Fig.2　Current wear rate of components contained in segments

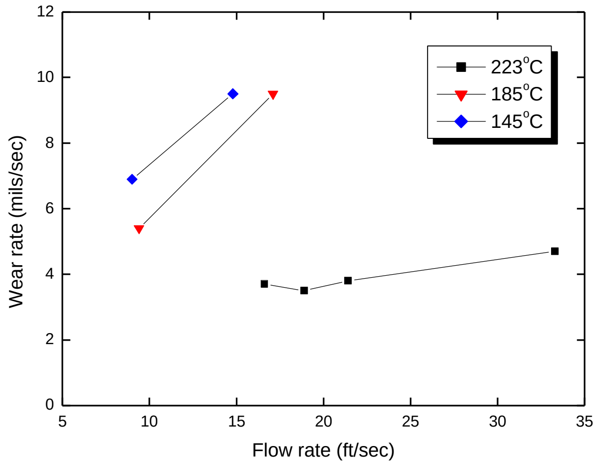


Fig. 3 Effect of flow rate on wear rate of a elbow component

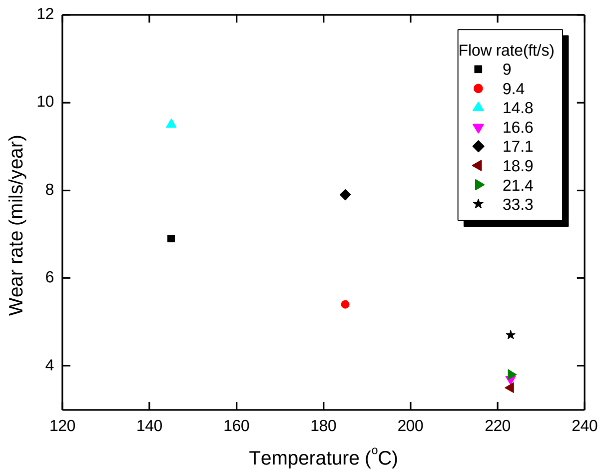


Fig. 4 Effect of temperature on wear rate of a elbow component

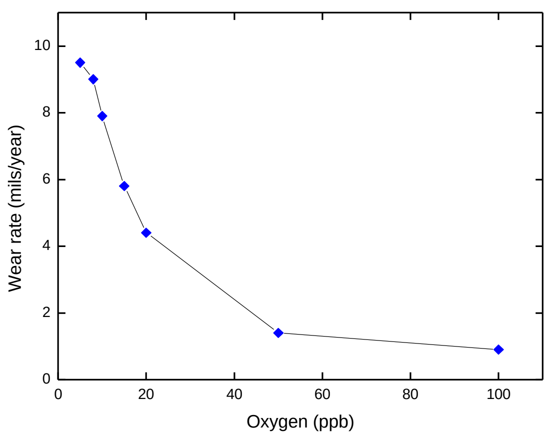


Fig. 5 Effect of dissolved oxygen on wear rate of a elbow component at pH 9.5(ammonia)

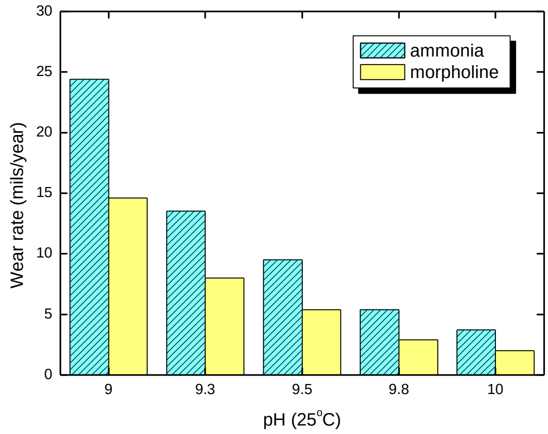
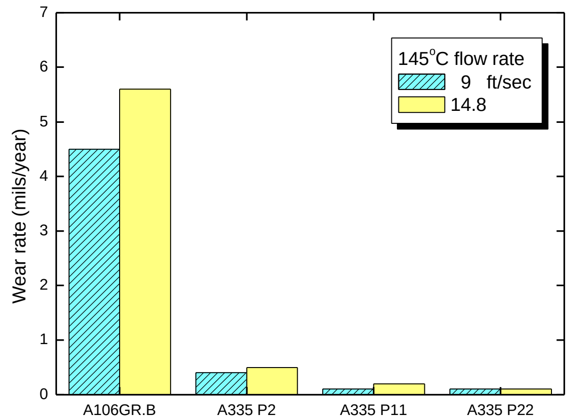
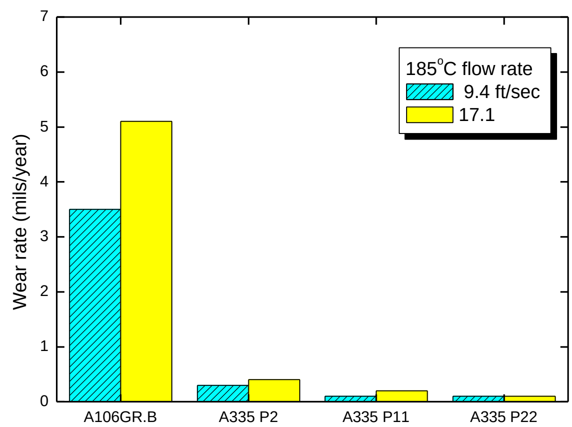


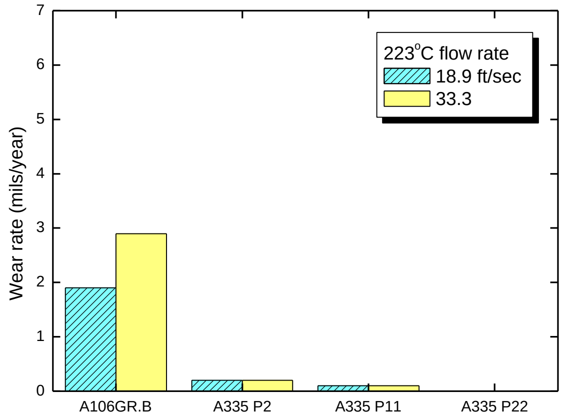
Fig. 6　Effect of amines on wear rate of a elbow component at SE2



(a)



(b)



(c)

Fig. 7 Effect of materials on wear rate of a pipe component at (a) 145℃ (b) 185℃ (c) 223℃