

용접 연결부의 거동에 관한 연구
A Study on the Behavior of Welded Connections

안 주옥* 윤 영만**
An, Zu-Og Yun, Young-Man

ABSTRACT

Welded connections have been designed on basis of allowable stresses, wherein the response to loading is assumed to be totally elastic. This is the vector analysis method, which resolves the stresses determined from the direct stress formula and the torsion formula into a vector combination to obtain a solution. It has been known that this method gives conservative answers and typically a very high factor of safety. An analytical method based on the Instantaneous Center of Rotation has been developed which predicts the ultimate strength of an eccentrically loaded fillet welded connection.

The method of Instantaneous Center of Rotation results in weld resistance capacities greater than the vector analysis method, by recognizing the variation in fillet weld strength with respect to the direction of the applied loading and actual load-deformation response of elemental fillet welds. The procedure of numerical analysis is iterative and complex. The relations between vector analysis method and the method of Instantaneous Center of Rotation on eccentric distance subjected to variation of load direction are presented in this paper. Considering of the effects on configuration of weld groups, the method of Instantaneous Center of Rotation are provided a more exact results of the numerical analysis.

1. 서 론

편심 재하된 용접 구조 연결부에 관한 연구들은 용접 그 자체의 거동보다는 전체 구조물의 연결 거동에 관심을 가졌다. 이와 같은 이유로 용접부의 파괴를 피하기 위하여 과다 크기의 용접설계가 되었다. 1959년 Archer, et al.⁽⁶⁾는 용접의 길이에 대한 작용하중 편심의 다양한 비(比)를 나타내는 일련의 실험들을 수행 하였으며, 이 실험의 결과에서 용접 길이에 대한 편심의 비(比)를 0.06에서 2.4까지 다양하게 주었을때 파괴에 대한 안전계수는 3.6에서 7.6까지 변화됨을 보였다. 1961년 Koenigsberger⁽⁷⁾는 편심 재하된 연결부에 대하여 수학적 해를 유도했고 실험 결과값과 비교했다. 그 해석에서 작용 하중은 다양한 각도로 적용하였으며, 용접 강도에서는 일정한 응력을 사용하여 용접 강도의 차이점을 무시하였기에 실험 결과보다 적은 값을 주었다. 또한 Butler, et al.⁽⁸⁾은 1978년 ASD Manual 표들을 만들어 극한하중 계산에서 안전계수를 3.33으로 일정하게 고려하여 편리하게 사용하도록 했다. 그리고 Kulak과 Timmer⁽⁹⁾의 연구에 의해 최근에는 LRFD Manual 표들을 만들게 되었다.

우리나라 현 시방서의 허용응력 설계법은 비틀림으로 인한 직접전단 응력과 조합응력들에 관한 필렛 용접 계산에서, 작용하중의 방향을 무시하고 단지 용접의 최소 목두께에서의 임계 전단 응력만을 계산하고 있다. 또한 필렛 용접들에 대한 허용 전단값은 용접재(熔接材)의 최소 인장강도의 30%로 일정하게 보고 있다.⁽⁶⁾

따라서, 편심 재하된 연결부의 우리나라 현 시방서 설계법은 다음의 이유로 비판적인 견해를 가지고 있다.

(1) 용접 길이에 대한 편심의 비(比)가 다양할때, 파괴에 대한 안전계수는 폭넓은 범위에 걸쳐서 다양함을 보인다.⁽⁶⁾

* 경희대학교 토목공학과 교수

** 동부엔지니어링 구조부, 경희대학교 토목공학과 석사졸업

- (2) 가로방향 필렛 용접의 추가된 강도는 설계 응력조항에서 고려 되지 않는다.
- (3) 비틀림 응력의 계산과정에서 현 시방서의 극관성 모멘트 사용은 엄격하게는 단지 원형 형상에 대해서만 정확하고 다른 용접배열에 대해서는 단지 근사적으로 고려했다.⁽³⁾
- (4) 용접강도가 다양한 모든 경우들의 용접에서 하중 작용방향의 변화를 무시했다.
- 따라서, 현 설계법은 정확하게 적용하기엔 다소 무리가 있으며 높은 안전계수가 사용되므로 비경제적 설계법이 된다. 또한, 용접의 형상에는 하중의 종류와 연결부의 형태에 따라 응력집중이 일어날 수 있기 때문에 연결부의 용접형상도 대칭 뿐만 아니라 비대칭 용접을 요구한다. LRFD Manual에서 여러가지 용접의 경우를 보여주지만, 비대칭에 관한 용접 형상에 대해서는 매우 빈약하기 때문에 더 많은 자료와 연구가 요구된다. 본 연구의 목적은 회전 순간 중심점을 이용하여 얻은 극한 하중 강도를 우리나라 현 시방서 설계법인 벡터 해석방법과 비교하고, 비대칭 용접 연결부의 극한 하중 강도를 쉽게 구하기 위한 표를 작성하는데 있다. 회전의 순간 중심점을 이용한 방법과 벡터 해석방법을 통하여 극한 하중 강도를 편심거리와 하중 작용방향에 따라 해석하여 두 방법의 차이를 비교하고, 또한 용접 형상에 따라 달라지는 극한 하중 강도를 알아본다. 그리고, 기존의 LRFD Manual 표에서 제시되지 않은 비대칭 용접에 대한 계수 C값을 표로 나타내어 설계시 극한 하중강도 계산에 이용할 수 있도록 하였다.

2. 용접 연결부의 해석 방법

용접 연결부의 해석방법에는, 순간 중심점(I.C)을 이용한 방법과 현재 우리나라에서 사용하는 허용 응력 설계법에서 이용한 벡터 해석방법⁽¹⁾을 이용하여 용접부의 극한 하중강도를 구하는 방법이 있다.

2-1. 회전의 순간 중심점을 이용한 방법

순간 중심점(I.C)을 이용한 방법은 연결부의 극한 하중을 예측하기 위하여 Butler, Pal, Kulak⁽⁶⁾에 의해 제시된 용접의 하중 - 변형 거동관계를 이용한다. 필렛 용접은 보통 연속적인 화스너이고 용접의 요소에 의해 지지된 최대 강도와 변형은 요소에서, 하중의 작용방향에 의해 좌우된다. 이 접근법에서 연속적인 용접을 각 요소의 길이로 나뉘고 용접의 각 요소에서 저항하는 힘은 용접요소의 중심에서 거동하는 것으로 가정한다. 전체적인 용접의 강도는 각 요소의 재하능력의 합으로 가정한다.

2-1-1 필렛 용접의 하중 - 변형 거동관계

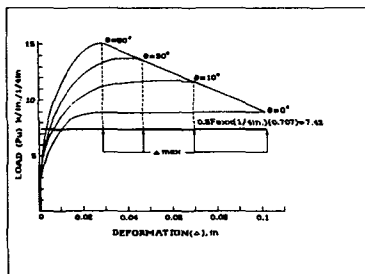
역학적인 화스너에 대한 하중 - 변형 거동관계는 다음과 같다.⁽⁶⁾

$$R_i = R_{iult} [1 - e^{-\mu \Delta_i}]^\lambda \quad (1)$$

여기서, R_i = 임의로 주어진 변형에서의 화스너 전단 하중

R_{iult} = 화스너에 의해 지지할 수 있는 극한 전단하중 μ, λ = 회귀 계수

Δ_i = 화스너의 전단, 힘, 지압변형과 연결판들의 극부 지압변형



모든 용접 연결부에 대해서 위 식(1)이 사용 가능하지만, 용접의 강도와 변형 특성치는 작용된 하중의 방향에 관계있기 때문에 이 변수는 설명 되어 져야 한다. 그림.1은⁽⁷⁾ 용접에 대한 작용하중 방향의 영향을 설명하기 위하여 연직면과의 작용하중 경사각을 0°, 10°, 30°, 90°의 4가지 경우에 대한 실험을 하여 하중 - 변형거동 관계에 대하여 나타냈다.

그림.1 E70exx ($t_e = \frac{1}{4}$) 필렛 용접에 대한 하중-변형 관계

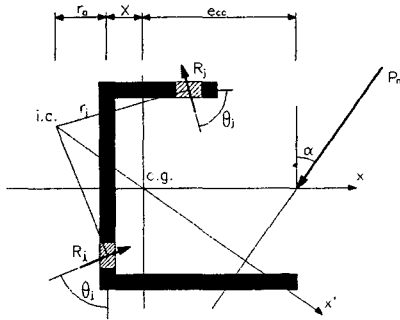


그림.2 필렛 용접의 극한 저항 하중

임의의 수평 부분 \$j\$용접 요소의 저항 전단 하중 \$R_j\$과의 각(角) \$\theta_j\$와 용접요소가 수직 부분에 있을때 저항 전단 하중 \$R_i\$과의 각(角) \$\theta_i\$는 다음과 같다.

$$\theta_j = \tan^{-1}\left(\frac{x_n}{y_n}\right) \quad (2)$$

$$\theta_i = \tan^{-1}\left(\frac{y_n}{r_o}\right) \quad (3)$$

또한, 극한 변형을 얻기 위해서 Kulak과 Timmler⁽⁹⁾가 제시한 다음의 식(4)를 이용한다.

$$\Delta_{imax} = \Delta_o \left[\frac{\theta}{5} + 1 \right]^{-0.47} \quad (4)$$

여기서, \$\Delta_o\$ = 그림.1에서 제시된 최대 변형(0.11in)

또한, 임의의 저항 전단하중 \$R_i^{(1)}\$는 그림.2에서의 같이 요소의 중심에서 거동하고 식(5)와 같다.

$$R_i = R_{iult} \left[1 - e^{(-k_1 \Delta_i / \Delta_o)} \right]^{k_2} \quad (5)$$

\$R_{iult}\$와 \$k_1, k_2\$는 저항 전단하중 \$R_i\$과 각 용접 요소와의 사이각 \$\theta\$값에 따라 변화되며 다음 경험식 들로부터 찾는다.⁽⁸⁾

$$R_{iult} = \frac{10 + \theta}{10 + 0.582\theta} (0.791 F_{exx} t_e) \quad (6)$$

여기서, \$F_{exx}\$ = 용접 전극강도, \$t_e\$ = 용접의 목두께

$$k_1 = \mu \Delta_o = 0.827 e^{0.0114 \theta} \quad (7)$$

$$k_2 = \lambda = 0.4 e^{0.0146 \theta} \quad (8)$$

작용하중에 대하여 용접의 각 요소의 전단저항하중 \$R_i\$가 전단력과 모멘트에 대해 평형을 만족되지 않으면 순간 중심점의 새로운 위치 (\$r_o = r_o \pm \Delta r_o\$)가 다시 선정되어야 한다. 수치해석의 반복과정에서 순간 중심점의 위치 \$r_o\$는 중력 중심(C.G)을 기준으로 하중 재하점의 반대편에서만 존재할 수 있으므로 \$r_o\$값을 맨 처음 정할때는 중력 중심을 기준으로 하중 재하점의 반대편에서 가정해야한다.

3. 수치해석

각 형상의 용접예를 수치해석하기 위해 프로그램을 작성하였으며 그림.3은 수치해석에 대한 흐름도이다. 본 수치해석에서는 하중작용방향 \$\alpha\$ 와 편심 거리 \$a\$, 용접 형상 \$k\$에 따른 극한하중값을 비교 분석하였다.

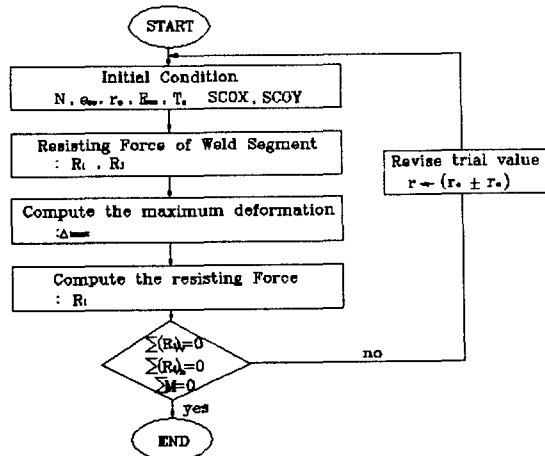


그림.3 회전의 순간 중심점을 이용한 방법의 수치해석 과정

3-1. 회전의 순간 중심점을 이용한 극한재하하중의 비교

용접연결부의 편심 재하하중을 얻기위한 식은 다음과 같다.

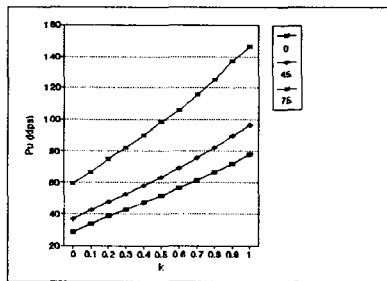
$$P_u = \phi P_n = C C_1 D l \quad (9)$$

여기서, C = Appendix table 참조, C_1 = 사용된 전극강도에 대한 계수

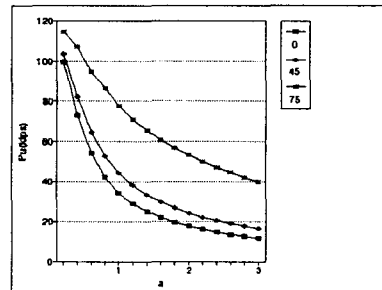
D = 용접크기, l = 수직용접길이

극한하중 P_n 의 계산과정중 식.(5)에서 계산된 저항전단하중 R_v 값이 필렛용접의 공칭강도보다 더 크잖이 나 올때는 다음과 같은 필렛용접의 최대공칭강도를 취한다.

$$R_n = 0.707 t_e (0.60 F_{ttx}) \quad (10)$$



(a) k - Pu 선도

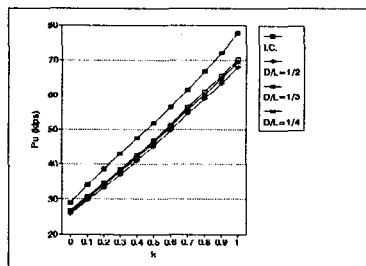


(b) a - Pu 선도

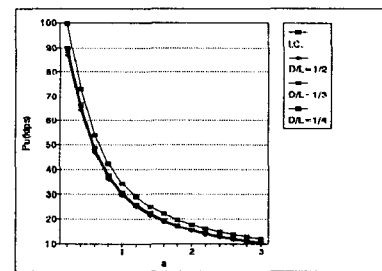
그림.4 하중작용방향에 따른 극한하중선도

3-2. 회전의 순간 중심점을 이용한 방법과 벡터 해석방법의 비교

순간 중심점을 이용한 방법과 사하중/활하중비(D/L)에 따른 벡터해석방법에 의한 결과치와 비교하였다.



(a) k - Pu 선도



(b) a - Pu 선도

그림.5 하중비에 따른 극한하중선도

3-3. 용접 형상에 따른 극한하중강도의 차이

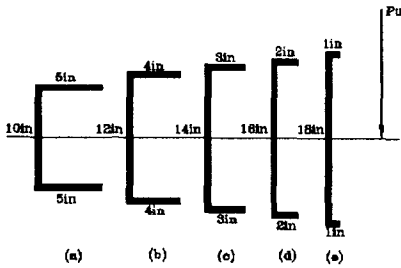
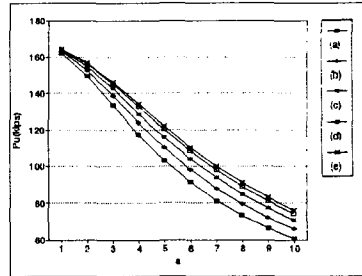
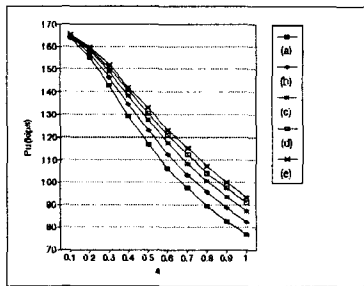


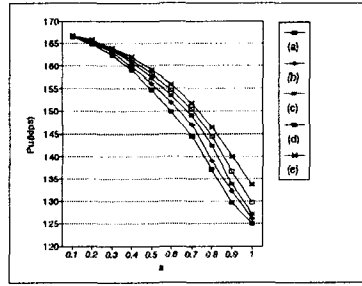
그림. 6 용접 형상



(a) 작용 하중이 연직($\alpha=0^\circ$)인 경우



(b) 작용 하중이 경사($\alpha=45^\circ$)인 경우



(c) 작용 하중이 경사($\alpha=75^\circ$)인 경우

그림. 7 용접 연결부 형상에 따른 극한 하중강도

용접연결부의 해석시 작용하중의 방향과 편심거리가 그림. 4와 같이 극한하중강도 결정에 매우 큰 영향을 준다. 또한, α 및 k 값에 대하여 순간 중심점을 이용한 해석법의 결과가 벡터 해석법보다 다소 큰 극한하중을 얻는다. (그림. 5) 그리고, 작용하중의 방향이 변하면서 용접요소의 최대변위가 여유치로 바뀌지만 용접 형상에 따른 도심의 거리차이를 용접의 연직 부분에서는 편심거리의 차이로 고려할 수 있기 때문에 극한 하중 결정에는 편심거리가 더욱 지배적인 것을 알 수 있다. (그림. 7) 따라서, 용접 연결부의 결정에서 작용 하중방향과 함께 용접 형상의 영향을 고려하는 것이 보다 정확한 용접 연결부의 해석임을 알 수 있다.

4. 결 론

- (1) LRFD Manual 에서 제시되지 않은 용접 형상의 설계시 극한 재하하중을 편리하게 구할 수 있도록 C계수 값을 얻었다.
- (2) 순간 중심점을 이용한 방법과 벡터 해석방법을 이용하여 구한 극한 재하하중을 비교하였으며, 작용하중의 방향과 편심 거리에 따른 극한 재하하중의 변화를 고찰했다.
- (3) 연결부의 용접 형상에 따른 극한 재하하중을 고찰하여 용접 형상의 차이에 따른 용접 연결부 재하능력의 영향을 확인하였다.

5. 참고 문헌

- (1) Charles G. Salmon, John E. Johnson, *Steel Structure Design and Behavior*, 1990, pp.106-297.
- (2) *Manual of Steel Construction (LRFD)*, AISC, 1993, pp. Part 8.

- (3) *Manual of Steel Construction* (ASD), AISC, 1986, pp. Part 4.
- (4) Graham W. Owens Brian D. Cheal, *Structural Steelwork Connections*, 1989.
- (5) 대한토목학회(1992), 도로교 표준시방서, 1990.
- (6) Archer, R.E., Fischer, H.K., and Kitchen, E.M., "Fillet Welds Subjected to Bending and Shear.", *Civil Engineering and Public Works Review*, VOL. 54, No. 634, April, 1959, pp. 455-458.
- (7) Koenigsberger, F., "Design Stresses in Fillet Weld Connection.", *Institute of Mechanical Engineers*, Vol. 165, 1961, pp. 148-157.
- (8) Lorne J. Butler, Shubendu Pal, and Geoffrey L. Kulak. "Eccentrically Loaded Welded Connection.", *Journal of Structural Division*, ASCE, 98, ST5, May, 1972, pp. 989-1005.
- (9) G.L. Kulak and P.A. Timmler. "Tests on Eccentrically Loaded Fillet Welds.", *Structural Engineering Report No. 124*, Department of Civil Engineering, University of Alberta, December, 1984
- (10) E. R. Holby. "Weld Appearances May Be Deceiving.", *Welding Journal*, 63, May, 1984, pp. 33-36.
- (11) John L. Dawe and Geoffrey L. Kulak. "Welded Connections under Combined Shear and Moment.", *Journal of Structural Division*, ASCE, 100, ST4 April, 1974, pp. 727-741.
- (12) G. Donald Brandt. "A General Solution for Eccentric Loads on Weld Group.", *Engineering Journal*, AISC, 19, 3, 1982, pp. 150-159.

Appendix

$$C = \frac{P_u}{D1C_1}$$

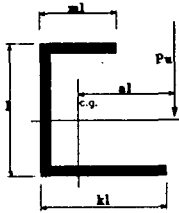


Table.1 (m = 0.1일 경우)

C 계수값

a \ k	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
0.3	1.212	1.337	1.454	1.570	1.688	1.803	1.920	2.042	2.160	2.281
0.6	0.754	0.845	0.930	1.014	1.101	1.190	1.284	1.380	1.480	1.584
0.9	0.525	0.593	0.657	0.720	0.785	0.855	0.930	1.004	1.087	1.175
1.2	0.398	0.452	0.504	0.554	0.609	0.662	0.724	0.778	0.831	0.885
1.5	0.321	0.366	0.407	0.448	0.494	0.539	0.591	0.636	0.682	0.727
2.0	0.241	0.274	0.307	0.339	0.375	0.411	0.444	0.477	0.510	0.543

Table.2 (m = 0.2일 경우)

C 계수값

a \ k	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
0.3	1.337	1.473	1.593	1.712	1.832	1.950	2.071	2.189	2.310	2.516
0.6	0.845	0.948	1.036	1.126	1.216	1.308	1.403	1.500	1.602	1.708
0.9	0.593	0.668	0.735	0.804	0.873	0.946	1.019	1.099	1.181	1.268
1.2	0.452	0.510	0.566	0.623	0.680	0.737	0.793	0.849	0.907	0.965
1.5	0.366	0.411	0.458	0.502	0.547	0.597	0.643	0.690	0.737	0.785
2.0	0.274	0.311	0.347	0.380	0.415	0.455	0.493	0.531	0.569	0.606

Table.3 ($m = 0.3$ 일 경우)

C 계수값

a \ k	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
0.3	1.454	1.593	1.725	1.843	1.963	2.085	2.204	2.324	2.449	2.571
0.6	0.930	1.036	1.137	1.227	1.319	1.414	1.510	1.610	1.713	1.817
0.9	0.657	0.735	0.811	0.881	0.953	1.027	1.103	1.185	1.268	1.356
1.2	0.504	0.566	0.623	0.680	0.738	0.797	0.860	0.929	0.998	1.067
1.5	0.407	0.458	0.504	0.551	0.599	0.650	0.703	0.762	0.821	0.880
2.0	0.307	0.347	0.382	0.418	0.456	0.496	0.539	0.587	0.635	0.683

Table.4 ($m = 0.4$ 일 경우)

C 계수값

a \ k	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
0.3	1.570	1.712	1.843	1.975	2.091	2.212	2.333	2.456	2.578	2.701
0.6	1.014	1.126	1.227	1.328	1.420	1.515	1.614	1.714	1.817	1.924
0.9	0.720	0.804	0.881	0.957	1.031	1.106	1.186	1.265	1.351	1.440
1.2	0.554	0.623	0.680	0.739	0.799	0.861	0.926	0.993	1.065	1.137
1.5	0.448	0.502	0.551	0.601	0.651	0.703	0.759	0.815	0.872	0.929
2.0	0.339	0.380	0.418	0.459	0.496	0.537	0.582	0.629	0.675	0.722

Table.5 ($m = 0.5$ 일 경우)

C 계수값

a \ k	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
0.3	1.688	1.832	1.963	2.091	2.225	2.338	2.460	2.582	2.708	2.831
0.6	1.101	1.216	1.319	1.420	1.521	1.615	1.714	1.815	1.920	2.026
0.9	0.785	0.873	0.953	1.031	1.107	1.185	1.263	1.346	1.431	1.520
1.2	0.609	0.680	0.737	0.799	0.860	0.925	0.989	1.059	1.130	1.201
1.5	0.494	0.547	0.599	0.651	0.702	0.756	0.811	0.871	0.931	0.990
2.0	0.375	0.415	0.456	0.496	0.537	0.580	0.614	0.672	0.730	0.788

Table.6 ($m = 0.6$ 일 경우)

C 계수값

a \ k	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
0.3	1.803	1.950	2.085	2.212	2.338	2.475	2.584	2.709	2.832	2.960
0.6	1.190	1.308	1.414	1.515	1.615	1.718	1.815	1.916	2.020	2.130
0.9	0.855	0.946	1.027	1.106	1.185	1.262	1.343	1.425	1.511	1.602
1.2	0.662	0.737	0.797	0.861	0.925	0.988	1.051	1.114	1.177	1.240
1.5	0.539	0.596	0.649	0.703	0.756	0.809	0.863	0.917	0.973	1.029
2.0	0.411	0.455	0.496	0.537	0.579	0.622	0.665	0.708	0.749	0.793

Table.7 ($m = 0.7$ 일 경우)

C 계수값

a \ k	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
0.3	1.920	2.071	2.204	2.333	2.460	2.584	2.728	2.833	2.958	3.082
0.6	1.284	1.403	1.510	1.614	1.714	1.815	1.920	2.018	2.123	2.229
0.9	0.930	1.019	1.103	1.186	1.263	1.343	1.423	1.506	1.593	1.683
1.2	0.724	0.793	0.860	0.926	0.989	1.051	1.121	1.191	1.262	1.33
1.5	0.591	0.643	0.703	0.759	0.811	0.863	0.915	0.967	1.021	1.075
2.0	0.444	0.493	0.540	0.582	0.614	0.664	0.717	0.765	0.813	0.859